



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

**Las interacciones suelo-atmósfera
en un deslizamiento superficial.
Análisis de datos auscultados en
Cercs (Pre-Pirineo Oriental)**

Trabajo realizado por:

Santiago Miguel Guzmán Guillén

Dirigido por:

Marcel Hürlimann

Jean Vaunat

Máster en:

Ingeniería del Terreno

Barcelona, **Junio del 2018**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

Agradecimientos

En primer lugar, agradecerle a Dios por darme la oportunidad de vivir y cumplir con mis metas profesionales hasta este momento. Por entregarme la capacidad y la fortaleza para mantenerme constante ante las adversidades que se han presentado en el camino, por ser la base de todos mis éxitos; por estar siempre a mi lado y no abandonarme nunca.

Especialmente a mis padres, quienes desde mi nacimiento han sido partícipes de cumplir mis sueños. Gracias a ellos, por sus esfuerzos y sacrificios inmensurables para que todos mis proyectos sean posibles, siempre inculcándome responsabilidad y perseverancia, teniendo fe en mí ante las metas propuestas en el trayecto de vida. Todos mis logros se lo dedico a ustedes.

A mi novia, por su continua preocupación en el trayecto de este proyecto, por mantenerme a flote en momentos de desesperación y por su apoyo incondicional.

A todos los profesores del máster que aportaron sus conocimientos para hacer de mí un mejor profesional, en especial a los profesores Marcel Hürlimann, Jean Vaunat y Antonio Lloret, por su entrega incondicional y sus consejos, por todo lo enseñado, no solo como asesores y maestros, sino también como profesionales, por su continua preocupación y corrección, muchas gracias.

Al Ministerio de Educación Superior, Ciencia y Tecnología (MESCYT), por brindarme la confianza y apoyo para poder cumplir este sueño de realizar este proyecto de vida.

Gracias a todos.

Resumen

Entre los movimientos de laderas, se encuentran los deslizamientos los cuales conforman uno de los tipos de movimientos más comunes. Los deslizamientos son producto de distintos factores, entre los cuales está la presencia de agua en el terreno. Las precipitaciones que caen sobre una ladera dependiendo de su intensidad, tiempo y permeabilidad del suelo, se infiltran en el terreno causando así un aumento de la presión del agua y por tanto una pérdida de resistencia del material.

En este proyecto se analiza el comportamiento hidrogeológico de una ladera ubicada en el municipio de Cercs, el cual pertenece a la comarca de Berguedá, Cataluña. El análisis se lleva a cabo para tres años (2015-2017) por medio de instrumentación de campo distribuida en dos estaciones. La estación METEO se encarga de registrar los datos de las precipitaciones por medio de un pluviómetro. La estación SLOPE se utiliza para medir el comportamiento de la ladera por medio de un piezómetro, un sensor de desplazamiento, dos sensores de succión y dos sensores de contenido de agua. No se presentan datos del sensor de desplazamiento por falta de calibración.

La zona de estudio la conforma un coluvión con matriz arcillosa, colocado encima de una capa de argilitas muy fracturadas y alteradas y más abajo otra capa de argilitas pero inalteradas. Dentro del coluvión se encuentran los dos sensores de succión a 23 y 36cm de profundidad, junto con los tres sensores de contenido de agua a 11, 23 y 36cm respectivamente. El sensor de contenido de agua localizado a 11cm de la superficie se instaló para el año 2017.

En general el 2015 fue el año con mayor cantidad de precipitaciones, registrándose la máxima precipitación tanto diaria como horaria de los tres años. Sin embargo, fue el único año en donde el piezómetro se mantuvo registrando valores negativos los cuales no fueron significativos. En el año 2016 se observaron varios episodios de alta intensidad, pero no superaron los del 2015. El 2017 fue el año con menores precipitaciones, registrando episodios de baja intensidad horaria, pero algunos de alta intensidad diaria. En este año se registró el valor más alto de presión de agua.

Para los tres años, los sensores más cercanos a la superficie (-23cm) registraron los mayores cambios debido a su cercanía con la superficie y a características propias del terreno. Los sensores de mayor profundidad (-36cm) presentan mayores incrementos a medida que aumenta la intensidad diaria de las lluvias. Asimismo, se registró la temperatura del suelo dada por los sensores de succión y el piezómetro, en donde se observaron menores fluctuaciones a medida que aumenta la profundidad. En general los tres años presentan temperaturas muy similares entre sí.

En los años 2016 y 2017 se completaron algunos datos de precipitación que faltaban realizando una extrapolación de los datos de precipitaciones de una estación meteorológica cercana, localizada en el municipio de Guardiola de Berguedá.

Abstract

Landslides are one of the most common type of movements of slopes. Landslides are produced by several factors like the presence of water in the soil. The precipitations that fall on a hillside, depending on its intensity, duration and the permeability of the soil, infiltrate in the soil causing an increase of the water pressure and therefore a loss of the material's strength.

This project analyzes the hydrogeological behavior of a hillside located in the municipality of Cercs, which belongs to the region of Berguedà, Catalonia. The analysis is carried out for three years (2015-2017) using field instrumentation distributed in two stations. The METEO station is responsible for recording rainfall data with a rain gauge. The SLOPE station is used to measure the behavior of the slope with a piezometer, a displacement sensor, two suction sensors and two water content sensors. Displacement sensor data is not presented due to a lack of calibration.

The study area is on a layer of a colluvium with a clay matrix, placed on top of a layer of very fractured and altered argillites and below it another layer of argillites but unaltered. Within the colluvium are the two suction sensors at 23 and 36cm of depth, together with the three water content sensors at 11, 23 and 36cm respectively. The water content sensor located at 11cm from the surface was installed for 2017.

In general, 2015 was the year with the highest amount of rainfall, registering the highest daily and hourly precipitation of the three years. However, it was the only year the piezometer kept recording negative values which were not significant. In 2016, several episodes of high intensity were observed, but they did not exceed those of 2015. 2017 was the year with the lowest rainfall, registering episodes of low hourly intensity, but some with high daily intensity. In this year the highest value of water pressure was recorded.

For the three years, the sensors closest to the surface (-23cm) registered the greatest changes due to their proximity to the surface and to the properties of the soil. The depth sensors (-36cm) show greater increases as the daily intensity of the rains increases. The soil temperature measured by the suction sensors and the piezometer was also recorded, where minor fluctuations were observed as the depth increases. In general, the three years show very similar temperatures.

In 2016 and 2017 some precipitation data were completed by extrapolating the precipitation data from a nearby meteorological station, located in the municipality of Guardiola de Berguedà.

Tabla de contenido

1.	Introducción	6
1.1.	Objetivos	6
2.	Marco conceptual	7
2.1.	Movimientos de ladera	7
2.1.1.	Deslizamientos traslacionales.....	7
2.1.2.	Deslizamientos rotacionales	7
2.1.3.	Caída de bloques.....	8
2.1.4.	Vuelcos (Topples)	9
2.1.5.	Expansiones laterales.....	9
2.1.6.	Flujos	10
2.2.	Partes de un deslizamiento	11
2.3.	Mecanismos de activación de deslizamientos	13
2.3.1.	Infiltración	13
2.3.2.	Superficie de rotura	13
3.	Zona de estudio	14
3.1.	Ubicación y descripción de la zona.....	14
3.2.	Geología	15
3.3.	Ensayo de laboratorio.....	15
3.3.1.	Ensayo de plasticidad	15
3.4.	Ensayo in situ	16
3.4.1.	Ensayo de infiltración	16
3.5.	Clima	17
3.6.	Estaciones y equipos de auscultación.....	17
3.7.	Estación SLOPE.....	18
3.8.	Estación METEO	22
4.	Metodología.....	25
4.1.	Obtención de datos	25
4.2.	Extrapolación de datos pluviométricos	25
4.3.	Interpretación de datos auscultados.....	25
4.3.1.	Observación a nivel anual	25
4.3.2.	Observación a nivel diario	25
5.	Resultados	26

5.1.	Análisis global 2015.....	26
5.1.1.	Precipitaciones.....	26
5.1.2.	Contenido de agua	26
5.1.3.	Succión	28
5.1.4.	Presión de agua.....	30
5.1.5.	Temperatura del suelo	31
5.1.6.	Temperatura del aire.....	32
5.2.	Análisis puntual 2015.....	32
5.2.1.	Episodio de máxima precipitación diaria	32
5.2.2.	Episodio de máxima precipitación horaria	35
5.3.	Análisis global 2016.....	37
5.3.1.	Precipitaciones.....	37
5.3.2.	Contenido de agua	38
5.3.3.	Succión	39
5.3.4.	Presión de agua.....	41
5.3.5.	Temperatura del suelo	41
5.3.6.	Temperatura del aire.....	42
5.4.	Análisis puntual 2016.....	43
5.4.1.	Episodio de máxima precipitación diaria	43
5.4.2.	Episodio de máxima precipitación horaria	45
5.5.	Análisis global 2017.....	47
5.5.1.	Precipitaciones.....	47
5.5.2.	Contenido de agua	48
5.5.3.	Succión	49
5.5.4.	Presión de agua.....	51
5.5.5.	Temperatura del suelo	52
5.5.6.	Temperatura del aire.....	52
5.6.	Análisis puntual 2017.....	53
5.6.1.	Episodio de máxima precipitación diaria	53
5.6.2.	Episodio de máxima precipitación horaria	55
5.7.	Relación de las precipitaciones con los registros	57
5.7.1.	Episodios más intensos del 2015	57
5.7.2.	Episodios más intensos del 2016	65
5.7.3.	Episodios más intensos del 2017	71
5.8.	Series completas 2015 – 2017.....	79

5.8.1.	Precipitaciones.....	79
5.8.2.	Contenido de agua	81
5.8.3.	Succión	82
5.8.4.	Presión de agua.....	82
5.8.5.	Temperatura del suelo	83
5.8.6.	Temperatura del aire	84
5.8.7.	Relación de las precipitaciones con los registros del 2015 - 2017	84
6.	Conclusiones.....	91
7.	Referencias	93

1. Introducción

Uno de los problemas más comunes de la mecánica del suelo y de rocas son los movimientos de laderas. Éstos mayormente tienen lugar en laderas con cierto grado de inestabilidad. Esta inestabilidad puede ser originada tanto por factores que provocan una pérdida de resistencia del terreno como por factores que logran aumentar los esfuerzos de corte en el mismo (González de Vallejo et al., 2002). Algunos de los factores que por lo general influyen en la inestabilidad de una ladera son el aumento de las presiones intersticiales, la erosión, la sismicidad, el relieve y también por qué tan alta sea la pendiente de la ladera con respecto al eje horizontal (Moya, 2017).

En general los tipos de movimientos de ladera se diferencian entre sí por los materiales involucrados y por el mecanismo y tipo de rotura. Los deslizamientos son el tipo de movimiento de ladera más común que existe, en donde el material entra en movimiento al deslizarse sobre una o múltiples superficies de rotura originadas cuando se sobrepasa la resistencia al corte del material (González de Vallejo et al., 2002).

La presencia de agua en el terreno por las precipitaciones constituye la mayor causa de inestabilidad por el aumento de las presiones intersticiales. Precipitaciones de alta intensidad ya sea por varias horas o hasta días, pueden dar lugar a la formación de deslizamientos (González de Vallejo et al., 2002).

Existen métodos para observar el comportamiento del suelo a través de las respuestas de éste por medio de cambios en el contenido de agua del terreno, en la succión y en la presión que el agua ejerce en los poros. Entre esos métodos están los sistemas de auscultación que permiten monitorizar la zona de estudio.

El siguiente proyecto analiza el comportamiento de un deslizamiento superficial muy lento, originado en una ladera ubicada en el municipio de Cercs perteneciente a la comarca de Berguedá, Cataluña. Se pretende a través de los registros de la instrumentación existente, observar el comportamiento del deslizamiento a lo largo de los último tres años (2015, 2016 y 2017). Asimismo, se analizan las respuestas del terreno ante las precipitaciones más intensas que experimenta la zona, con la finalidad de tener un conocimiento más amplio del efecto que produce la infiltración del agua precipitada y así poder tomar las medidas pertinentes ante una posible aceleración en el desplazamiento de la masa inestable.

1.1. Objetivos

Analizar el comportamiento de un deslizamiento superficial a lo largo de tres años por medio de las interacciones entre el suelo y la atmosfera. Los puntos a trabajar para lograr este objetivo son:

- Recopilación de datos auscultados por la instrumentación de la zona.
- Análisis de la respuesta del terreno ante episodios donde varíe tanto la intensidad como la duración de las precipitaciones.

2. Marco conceptual

2.1. Movimientos de ladera

Es el desplazamiento hacia abajo de una masa de suelo o roca en una ladera, producido sobre una o varias superficies de rotura, cuando esta masa se ha vuelto inestable por distintos factores, que generan una pérdida de resistencia del terreno, permitiendo así su movimiento. (Universidad Nacional de Rosario, 2003).

Entre los factores que dan lugar a movimientos de ladera se encuentran las fuertes precipitaciones y movimientos en el terreno ocasionados por sismos, produciendo así, la pérdida de resistencia necesaria para que la masa de tierra o rocosa entre en movimiento.

Dependiendo de sus características cinemáticas y el tipo de material involucrado en la masa inestable, los movimientos de laderas pueden ser:

2.1.1. Deslizamientos traslacionales

Es un tipo de deslizamiento de tierra en el que la masa se desplaza sobre una superficie de rotura plana u ondulada. Este tipo de movimiento es típico en estratos débiles como arcillas blandas, limos no plásticos y arenas finas. (Universidad Nacional de Rosario, 2003). Ver Figura 1.

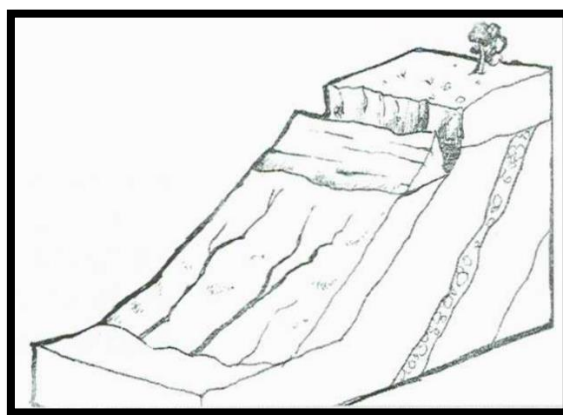


Figura 1. Deslizamiento traslacional (Corominas, 1997)

2.1.2. Deslizamientos rotacionales

Este tipo de deslizamiento de tierra es típico en materiales arcillosos homogéneos y en macizos rocosos altamente fracturados, en el cual el terreno gira con respecto a una superficie de rotura curva formada. (Corominas, 1997). Ver Figura 2.

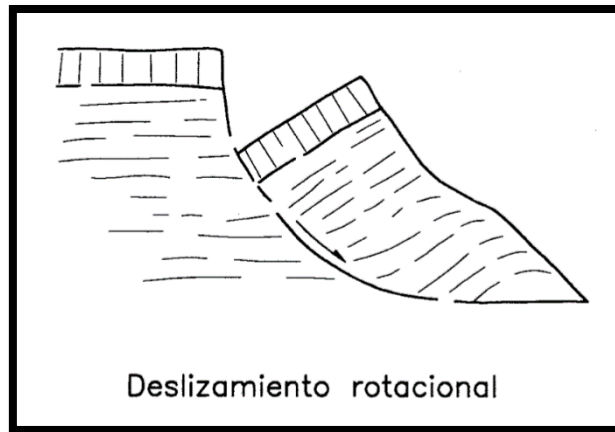


Figura 2. Deslizamiento rotacional (Corominas, 1997)

2.1.3. Caída de bloques

Es un movimiento abrupto que se caracteriza por el desprendimiento de masa rocosa en pendientes empinadas o acantilados. Es un movimiento de caída libre en el cual su ruptura se da por las discontinuidades de la roca en donde no solo se desprende el material, sino que rebota en la superficie y rueda sobre ella.

La gravedad, cambios de temperatura y la influencia de presiones intersticiales son los mayores causantes de este tipo de movimiento de ladera. Es importante destacar que si la pendiente rocosa posee un ángulo de 75° el desprendimiento será por caída libre, sin embargo, si el ángulo es de alrededor de 45° el movimiento será por rodadura. (USGS, 2004). Ver Figura 3.

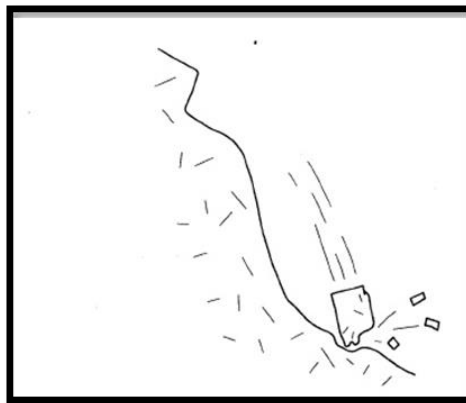


Figura 3. Caída de bloque (Corominas, 1997)

2.1.4. Vuelcos (Topples)

Movimiento de ladera originado tanto por la gravedad como por el empuje de terreno adyacente y presencia de agua en las grietas, ocasionando que la masa de suelo o roca rote hacia delante y exterior de la ladera, alrededor de un eje localizado por debajo de su centro de gravedad. Existen dos tipos de vuelcos: (Corominas, 1997)

- **Vuelco por flexión:** Se produce en filitas, esquistos y pizarras en donde la masa rocosa forma vigas semicontinuas en voladizo que luego rompen por flexión.
- **Desplome:** En este movimiento la masa gira con respecto a una base y cae bruscamente. Este tipo de vuelco se produce en bordes acantilados rocosos o en materiales areno-arcillosos compactados. Ver Figura 4.

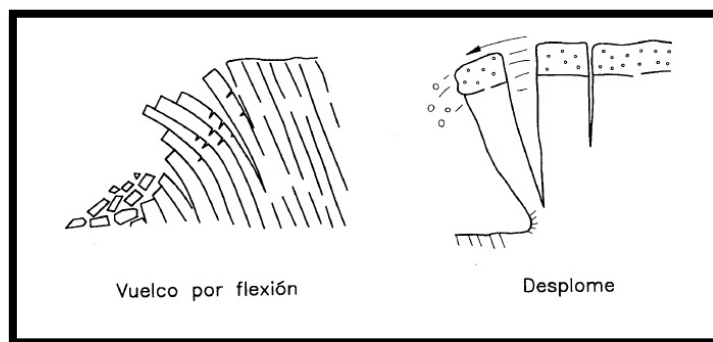


Figura 4. Tipos de vuelcos (Corominas, 1997)

2.1.5. Expansiones laterales

Consiste en la expansión o separación de estratos rocosos o de suelo que se encuentran por encima de un estrato débil y blando en pendientes bajas o hasta en superficies planas. Este movimiento se produce por alguna subsidencia que sufre el estrato blando. Comúnmente se produce en suelos susceptibles a la licuefacción en zonas sísmicas. Las expansiones no son muy frecuentes, pero cuando ocurren pueden llegar a cubrir cientos de metros (USGS, 2008). Ver Figura 5.

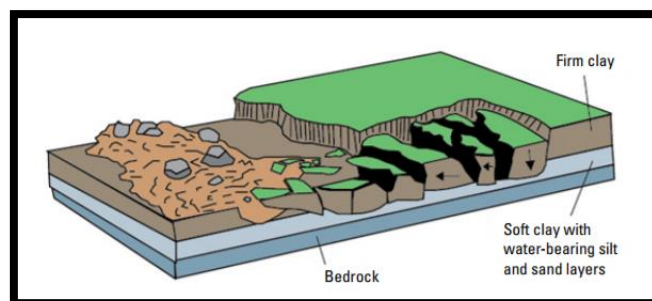


Figura 5. Expansión lateral (USGS, 2008)

2.1.6. Flujos

“Son movimientos espacialmente continuos en los que las superficies de cizalla tienen corta vida, se encuentran muy próximas y generalmente no se conservan. La distribución de velocidades en la masa desplazada se parece a la que se presenta en un fluido viscoso” (Corominas, 1997).

En este tipo de movimiento no se conserva la estructura interna del material, convirtiéndose en un flujo. En los flujos se pueden identificar tres zonas:

- Zona de rotura (cabecera).
- Zona intermedia o de canal.
- Zona de acumulación.

Entre los flujos más comunes se encuentran:

- **Coladas de tierra:** Este tipo de flujo es rico en materiales arcillosos (>30%). Su estructura es elongada formando una especie de lengua. Posee una velocidad de pocos metros por día. Las pendientes donde se forma son por lo general bajas (10° - 20°) y ocurren generalmente a causa de una alta o moderada intensidad de lluvias diarias. (Moya, 2017). Ver Figura 6.

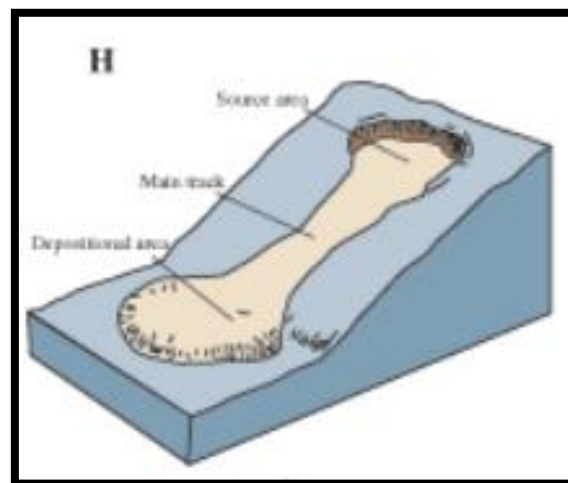


Figura 6. Colada de tierra (USGS, 2008)

- **Corrientes de derrubios:** Este flujo es una mezcla de rocas, suelo granular y a veces materia orgánica con agua que tiene lugar en pendientes grandes (30° - 50°). Su velocidad posee un rango de 5 - 20 m/s y es por esto por lo que pueden ser letales. Como se mencionó anteriormente se da en suelos granulares con un porcentaje muy bajo en materiales finos (<5%). Su forma es también de lengua, pero un tanto más irregular que las coladas.

Se producen generalmente tras una alta intensidad horaria de lluvias (>20 mm/h). Los deslizamientos pueden convertirse en corrientes de derrubios si la masa en movimiento aumenta su contenido de agua. (Moya, 2017) y (USGS, 2008). Ver Figura 7.

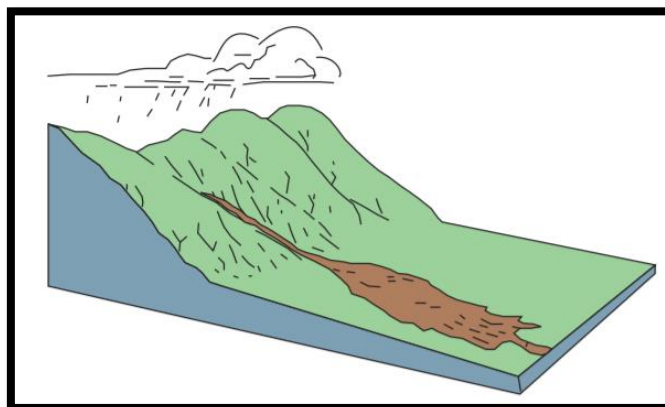


Figura 7. Corriente de derrubios (USGS, 2008)

2.2. Partes de un deslizamiento

Entre las partes que conforman un deslizamiento se encuentran (Ibsen et al., 1996). Ver Figura 8:

1. Corona: Es la zona de la ladera que no ha deslizado y se ubica por arriba del escarpe principal.
2. Escarpe principal: Es una superficie que posee una pendiente elevada, originada por el movimiento del material movilizado. Se encuentra en la parte más arriba del deslizamiento, específicamente entre la cabeza del deslizamiento y la ladera que se ha mantenido estable.
3. Tope: Es el punto más elevado que se encuentra entre el escarpe principal y el terreno deslizado.
4. Cabeza: Representa la zona superior del deslizamiento, localizada entre el escarpe principal y el terreno deslizado. Dentro de esta zona se ubica el tope del deslizamiento.
5. Escarpe secundario: Es otra superficie de pendiente importante que se forma en el terreno movilizado producto de desplazamientos diferenciales internos del mismo.
6. Cuerpo principal: Es la masa del terreno que deslizó sobre la superficie de rotura y se ubica entre el escarpe principal y el borde de la superficie de rotura.
7. Pie del deslizamiento: Representa la fracción del deslizamiento que posterior al movimiento, se deposita sobre la superficie original del terreno.
8. Punta: Es el punto más alejado del tope y se ubica dentro borde del deslizamiento.

9. Borde del deslizamiento: Es la parte del deslizamiento más alejada del escarpe principal, por lo general tiene una forma curva por el material deslizado. Representa la zona de menor elevación del deslizamiento.
10. Superficie de rotura: Es el área donde se produce la ruptura del material y sobre la cual el terreno desliza.
11. Borde de superficie de rotura: Es la frontera entre la parte inferior de la superficie de rotura y el terreno original cubierto por el pie del deslizamiento.
12. Superficie de separación: Conformar la zona del terreno original que está por debajo del pie del deslizamiento.
13. Material desplazado: Es el volumen de terreno que fue desplazado a causa del deslizamiento.
14. Zona de desprendimiento: Es la superficie que formaba parte de la superficie original del terreno y a causa del movimiento fue desplazada hacia abajo.
15. Zona acumulación: Es la zona donde se ubica el pie del deslizamiento.
16. Desprendimiento: Representa el volumen entre la superficie original del terreno, el material desplazado y el escarpe principal del deslizamiento.
17. Masa desprendida: Representa la porción del material deslizado localizada debajo del terreno original y sobre la superficie de rotura.
18. Acumulación: Es la cantidad de terreno desplazado que se coloca sobre la superficie original del terreno.
19. Flanco: Representa el terreno de los costados izquierdo y derecho del deslizamiento que no fue desplazado.
20. Superficie original del terreno: Superficie del terreno previa al deslizamiento.

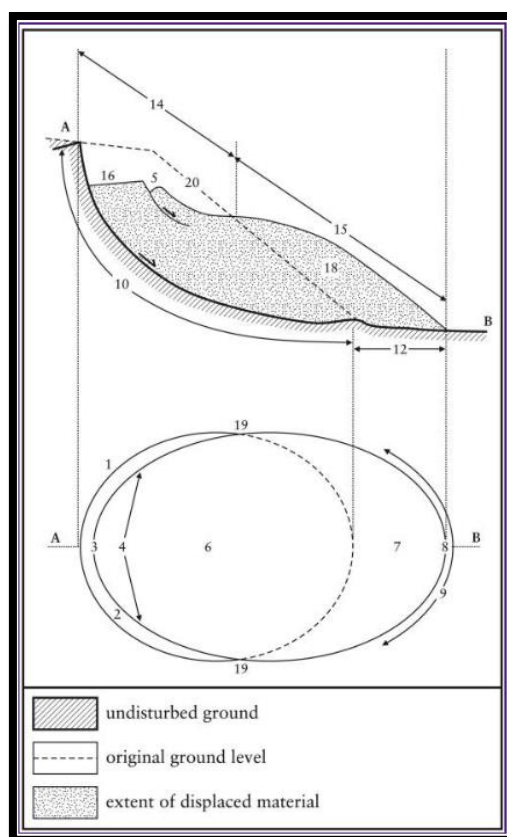


Figura 8. Partes de un deslizamiento (Cooper, 2007)

2.3. Mecanismos de activación de deslizamientos

La intensidad, cantidad y distribución de las precipitaciones son de los factores que controlan la activación de los movimientos de ladera. Asimismo, dichos factores en conjunto con la permeabilidad, contenido de agua inicial del suelo y vegetación de la zona, determinan el volumen de agua que se infiltra en el terreno. (González de Vallejo et al., 2002).

2.3.1. Infiltración

Se conoce como infiltración a la acción del agua que cae como precipitación o por irrigación de introducirse en el terreno (Iwata et al., 1995). A medida que el agua va humedeciendo el terreno, ésta se mueve hacia abajo por gravedad y hacia los lados por capilaridad. El movimiento de agua en el suelo está fuertemente relacionado al tamaño de partículas sólidas y el tamaño de los poros. El agua en el terreno ejerce una presión que intenta separar las partículas sólidas y de esta manera reduce la resistencia al corte del material.

2.3.2. Superficie de rotura

Es el área por la cual se desliza la masa de terreno inestable. Se forma a partir de la rotura de puntos en el terreno en donde se pierde resistencia al corte y ocurre una redistribución de esfuerzos a otros puntos que eventualmente llegan a rotura. Las roturas se producen en muchos casos por el aumento de agua en el terreno que va reduciendo su resistencia.

3. Zona de estudio

3.1. Ubicación y descripción de la zona

El municipio de Cercs pertenece junto a otros 30 a la comarca de Berguedá, Catalunya (ver Figura 9). Cercs limita al sur con Berga, municipio capital de la comarca de Berguedá. Al noreste limita con La Nou de Berguedá y al sureste con Vilada de Berguedá. En todo el lado oeste se encuentran los Rasos de Peguera y al norte Vallcebre y el municipio de Guardiola de Berguedá (ver Figura 10).

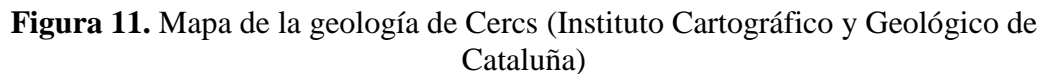


Figura 9. Vista aérea del municipio de Cercs (Extraído de Google Earth)



Figura 10. Límites de Cercs y localización de Guardiola de Berguedá (Extraído de Google Earth)

Para la determinación de la geología de Cercs, se utilizaron los mapas geológicos del Instituto Cartográfico y Geológico de Catalunya (ICGC).



3.3. Ensayo de laboratorio

En la investigación realizada por (Cedeño Ramírez, 2014) se tomaron muestras del terreno mediante sondeos manuales y una muestra bloque con el fin de ensayarlas en el laboratorio y obtener más información de la geología y propiedades de los materiales de la zona de estudio.

En el laboratorio se procedió a determinar el límite líquido de las muestras para conocer el contenido de humedad máximo que pueden tener las muestras antes de pasar a un estado líquido. Asimismo, se calculó el límite plástico para saber el valor de humedad mínimo que puede tener una muestra sin pasar a un estado semisólido.

Con ambos valores se determinó el índice de plasticidad de las muestras (Figura 12) y se utilizó la Carta de plasticidad de Casagrande (ver Figura 13) para complementar la identificación de las muestras. Con los resultados obtenidos se determinó que las muestras son arcillas de baja plasticidad (CL).

LÍMIT LÍQUID					LÍMIT PLÀSTIC		
nº de cops	18	28	36		1	1	0
Referència de la tara							
$a=(t+s+a)-(t+s)$	1.56	1.64	1.46	0	0.7	0.86	0
$t+s+a$	14.23	14.77	14.28		17.17	17.12	
$t+s$	12.67	13.13	12.82		16.47	16.26	
t	9.17	9.21	9.22		12.54	11.66	
$s=(t+s)-t$	3.5	3.92	3.6	0	3.93	4.6	0
$w=a/s*100$	44.57	41.84	40.56	1	17.81	18.7	0
LL= 42.52				LP= 18.26		IP= 24.26	

Figura 12. Límites de Atterberg (Cedeño Ramírez, 2014)

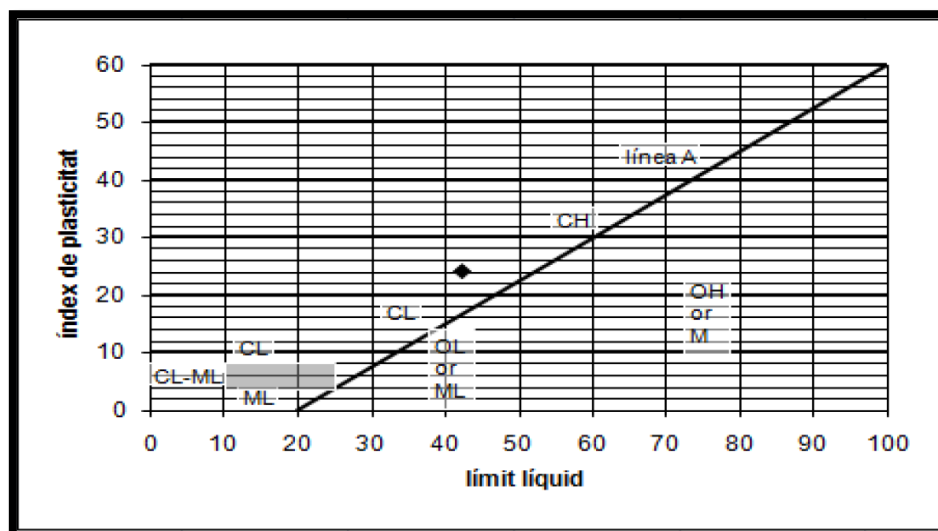


Figura 13. Carta de plasticidad de Casagrande (Cedeño Ramírez, 2014)

3.4. Ensayo in situ

3.4.1. Ensayo de infiltración

En la ladera de Cercs, específicamente en el coluvión, se llevó a cabo un ensayo de infiltración por (Cedeño Ramírez, 2014) para determinar la permeabilidad del material. Este ensayo de infiltración consiste en observar el tiempo que se toma cierta cantidad de agua contenida en un infiltrómetro o tubo colocado sobre el terreno, en infiltrarse. Los parámetros obtenidos por el ensayo se pueden observar en la Tabla 1.

Tabla 1. Datos del ensayo de infiltración (Martínez Camposano, 2016)

Ensayo	Radio (cm/s)	α	n/h ₀	Succión (cm/s)	Área (cm ²)	Carga hidráulica	Permeabilidad (cm/s)
1	2.25	0.005	1.09	-2	6.359	2.044×10^{-4}	3.21×10^{-5}
2	2.25	0.005	1.09	-2	6.359	2.606×10^{-4}	4.10×10^{-5}

Los valores de permeabilidad obtenidos de los ensayos de infiltración muestran que el terreno tiene una permeabilidad baja. Este tipo de suelo de permeabilidad baja responde mayormente a episodios de precipitaciones con alta o moderada intensidad diaria, es decir, episodios de larga duración, para que el agua pueda infiltrarse en el terreno y no circular como escorrentía (Moya, 2017).

No obstante, la capacidad de infiltración de un suelo depende de ciertos factores como su grado de compactación, su contenido de agua previo a la lluvia y los materiales que lo conformen (Cedeño Ramírez, 2014). Por esta razón es de suma importancia al momento de analizar cambios significativos en los registros de los sensores, si el terreno se encontraba húmedo o no antes del episodio.

3.5. Clima

En general Cercs posee un clima templado y cálido, con una temperatura promedio de 12°C. Cercs es una zona con precipitaciones significativas, en donde en los meses más secos por lo general se registran grandes cantidades de lluvia. El registro de precipitación media anual es de 747mm (Climate-Data, s.f.).

Según la clasificación climática de Köppen, Cercs pertenece al grupo “Cfb”. Esta categoría se les asigna a regiones con climas templados (tipo C), con precipitaciones constantes durante el año (f) y con una temperatura media en más de cuatro meses al año por encima de los 10°C y en el mes más cálido una temperatura media por debajo de los 22°C. (Clasificación de Köppen en territorio español, s.f.).

3.6. Estaciones y equipos de auscultación

Para observar el comportamiento del terreno ante la influencia de las precipitaciones, es necesario un sistema de auscultación que registre datos de los parámetros de succión, contenido de agua y presión de agua en el terreno. El sistema de monitorización se distribuye en dos estaciones: SLOPE y METEO (ver Figura 14).

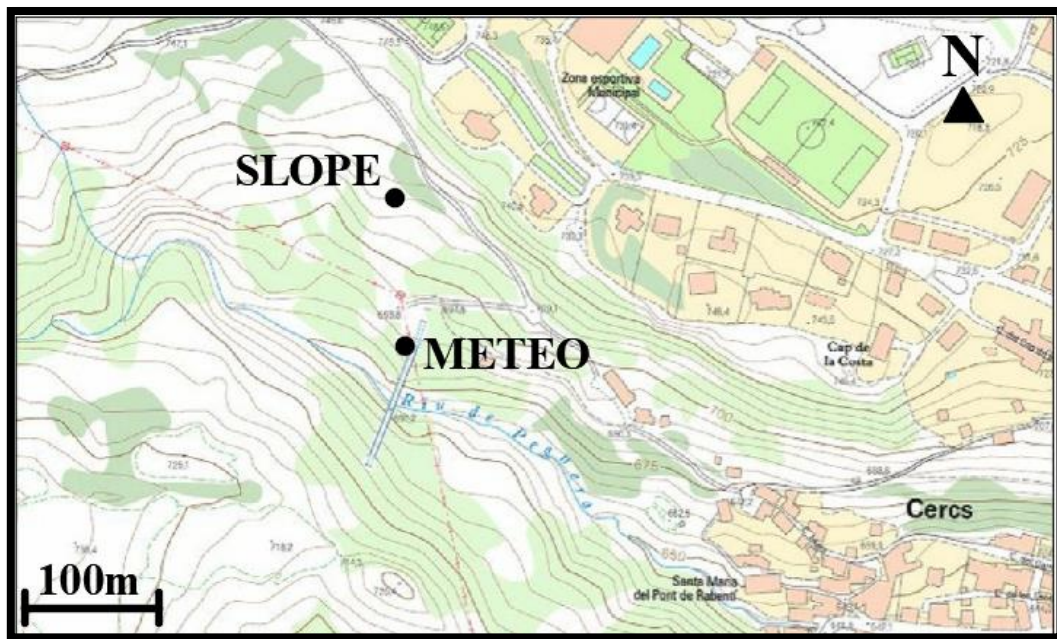


Figura 14. Ubicación de las estaciones SLOPE y METEO (Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña)

3.7. Estación SLOPE

La estación SLOPE se localiza en la ladera del deslizamiento y es la que contiene la mayor cantidad de instrumentación.

- Decagon MPS-2: La estación contiene dos de estos sensores de succión y temperatura, uno a 23 centímetros y el otro a 36 centímetros de profundidad.



Figura 15. Sensor de succión Decagon MPS-2 (MPS-2 Dielectric Water Potential Sensor: Operator's Manual)

- Decagon 10HS: Tres sensores de contenido de agua ubicados a 11, 23 y 36 centímetros de profundidad. Para los años 2015 y 2016 no existía el más superficial (-11cm), se instaló para el 2017.



Figura 16. Sensor de contenido de agua Decagon 10HS (10HS Soil Moisture Sensor: Operator's Manual)

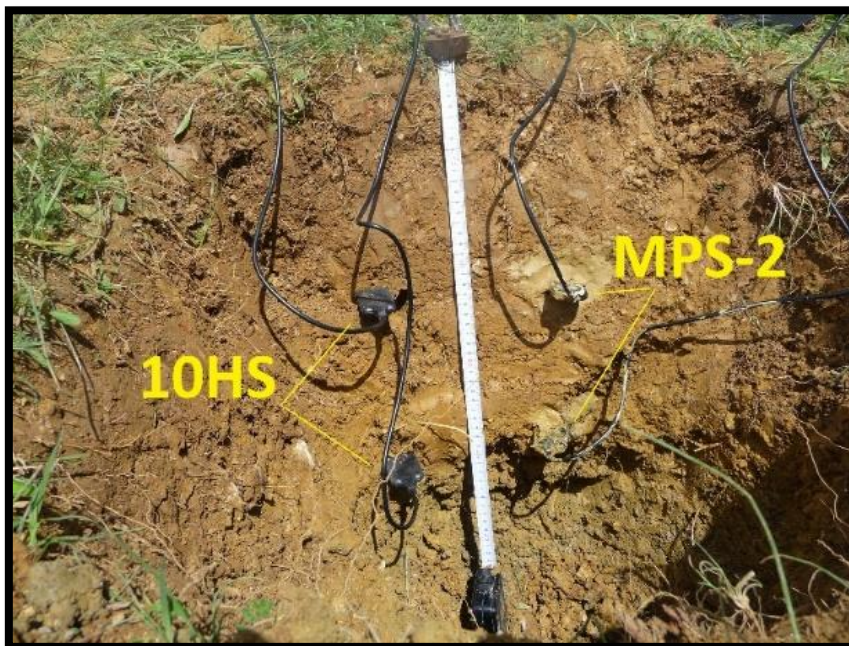


Figura 17. Instalación de sensores de contenido de agua y los sensores de succión (Universidad Politécnica de Cataluña)

- Geosense WP-3200: Piezómetro de cuerda vibrante instalado a 85 centímetros de profundidad, para medir las presiones de agua y la temperatura del suelo. Asimismo, registra posibles elevaciones del nivel freático.



Figura 18. Piezómetro Geosense WP-3200 (VW Piezometers Instruction Manual)



Figura 19. Sondeo para instalación del piezómetro (Universidad Politécnica de Cataluña)

- ASM WS12-3000: Sensor de desplazamiento colocado en la superficie de la ladera, pero no se poseen registros debido a que necesita calibrarse.



Figura 20. Sensor de desplazamiento ASM WS12-3000 (WS12 Position Sensor Datasheet)

En la Figura 21 se puede apreciar desde la superficie la ubicación de los sensores mencionados y en la Figura 22 la ubicación dentro del terreno y la geología de éste.

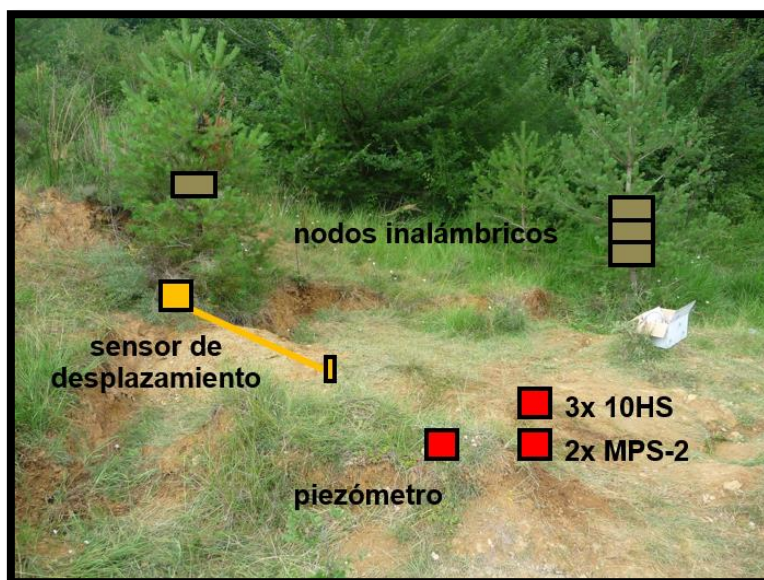


Figura 21. Ubicación en superficie de la instrumentación (Universidad Politécnica de Cataluña)

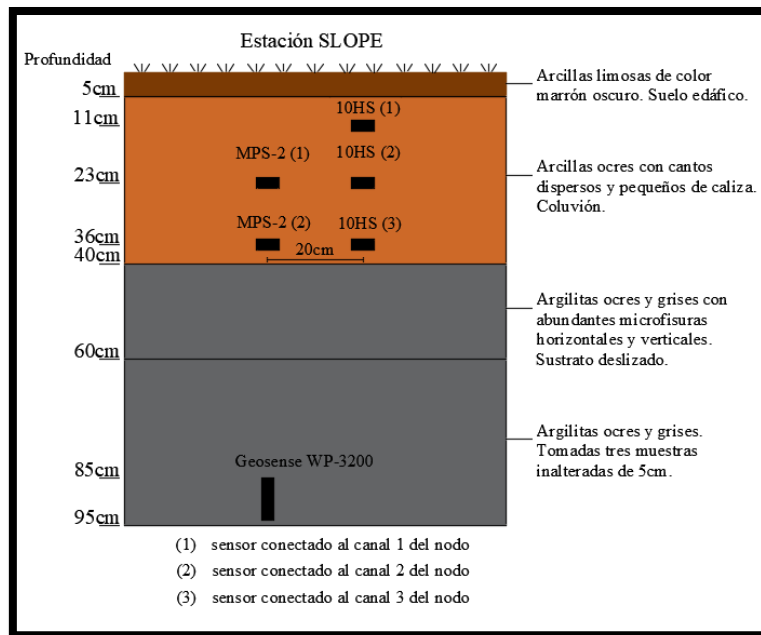


Figura 22. Ubicación en profundidad de la instrumentación (Universidad Politécnica de Cataluña)

3.8. Estación METEO

Es una estación meteorológica ubicada pendiente abajo de la ladera donde se ubica la estación SLOPE y justo al lado del acueducto que cruza el Riu de Peguera. Esta estación cuenta con el equipo necesario para suministrar los datos meteorológicos de la zona.

- Decagon ECRN-100: Es el pluviómetro de la estación encargado de registrar las precipitaciones de la zona. Es un sensor muy sensible debido a que cuenta en su interior con un sistema de doble cuchara que registra un conteo por cada 0.2mm de lluvia que cae (High Resolution Rain Gauge Manual).



Figura 23. Pluviómetro Decagon ECRN-100

- Campbell Scientific HC2S3: Sensor preciso y robusto, encargado de medir tanto la humedad como la temperatura del aire (HC2S3 Temperature and Relative Humidity Instruction Manual).



Figura 24. Sensor de humedad y temperatura del aire Campbell Scientific HC2S3

- **BMP085 BOSCH:** Barómetro de alta precisión que registra la presión atmosférica de la zona para utilizar estos datos y los del piezómetro y así obtener las medidas de presión de agua.



Figura 25. Barómetro BMP085 BOSCH (BMP085 Digital Pressure Sensor Data Sheet)

Para el almacenamiento de datos se utilizan unos data loggers los cuales reciben los datos de los sensores y los envían a los servidores del departamento de geología de la UPC.

Los únicos sensores con este sistema de transmisión de datos son los sensores de contenido de agua, el piezómetro y el sensor de desplazamiento, para los demás sensores es necesario descargar los datos in situ.



Figura 26. Data logger de la estación METEO

4. Metodología

4.1. Obtención de datos

Los datos arrojados por la instrumentación de la zona durante los tres años (2015-2017) fue obtenida por medio de data loggers que transfieren la información recopilada de la instrumentación a los ordenadores del departamento de Ingeniería del Terreno de la Universidad Politécnica de Catalunya. Sólo los data loggers del piezómetro, los sensores de contenido de agua y el sensor de desplazamiento poseen la capacidad de enviar los datos a los ordenadores, los demás datos se necesitan descargar in situ.

Desafortunadamente no se poseen todos los datos completos de precipitaciones para los años 2016 y 2017. Los datos de la instrumentación de la estación SLOPE están incompletos para los tres años, faltando de uno a dos meses de datos en algunos casos y hasta cuatro meses en otros casos.

4.2. Extrapolación de datos pluviométricos

Como se mencionó anteriormente, para los años 2016 y 2017 faltan datos de precipitaciones, específicamente seis meses y dos meses y medio respectivamente.

Para rellenar estos huecos se procedió a utilizar datos de una estación automática oficial de METEOCAT, ubicada en el municipio de Guardiola en la misma comarca de Berguedá. Los municipios de Cercs y Guardiola están separados por alrededor de 13 kilómetros por lo que las condiciones climatológicas y meteorológicas de cada zona no están tan divorciadas entre sí.

Con los datos de lluvias de cada zona y para los mismos períodos del año 2017 se realizó una comparación en la cual se observó que en la zona de Cercs llovió más. En esta comparación también se observó que los episodios de lluvia en su mayoría son más intensos en Cercs y en ocasiones de mayor duración.

A partir de estos datos se trazó una línea de tendencia que permitiera arrojar una ecuación con la cual generar datos nuevos de lluvia para la zona de Cercs a partir de los datos de Guardiola, con el fin de rellenar los huecos existentes en los registros de ambos años (2016 y 2017).

4.3. Interpretación de datos auscultados

4.3.1. Observación a nivel anual

Los datos pluviométricos de la estación METEO y los datos arrojados por la instrumentación de la estación SLOPE se utilizaron para realizar gráficos anuales con la finalidad de observar la respuesta de cada sensor antes la precipitación anual de cada uno de los tres años (2015-2017). Se analizaron los tres años por separado y luego en conjunto para observar el comportamiento de un año a otro.

4.3.2. Observación a nivel diario

De cada año se seleccionaron los episodios de lluvias que más cambios produjeron en cada sensor para tener una visión más amplia del episodio y poder arrojar conclusiones sobre el comportamiento de cada sensor.

5. Resultados

5.1. Análisis global 2015

5.1.1. Precipitaciones

Este análisis contiene las respuestas de cada sensor ante los episodios de lluvia de todo el año 2015. Los estudios realizados para cada año contemplan los episodios que más cambios produjeron en las medidas de los sensores.

Se analizan episodios tanto de intensidades diarias como horarias para tener una idea más acertada sobre bajo qué tipo de condiciones el terreno presenta una mayor respuesta. Es importante conocer todos los factores y condiciones que afectan la estabilidad del terreno para poder tomar las medidas de lugar.

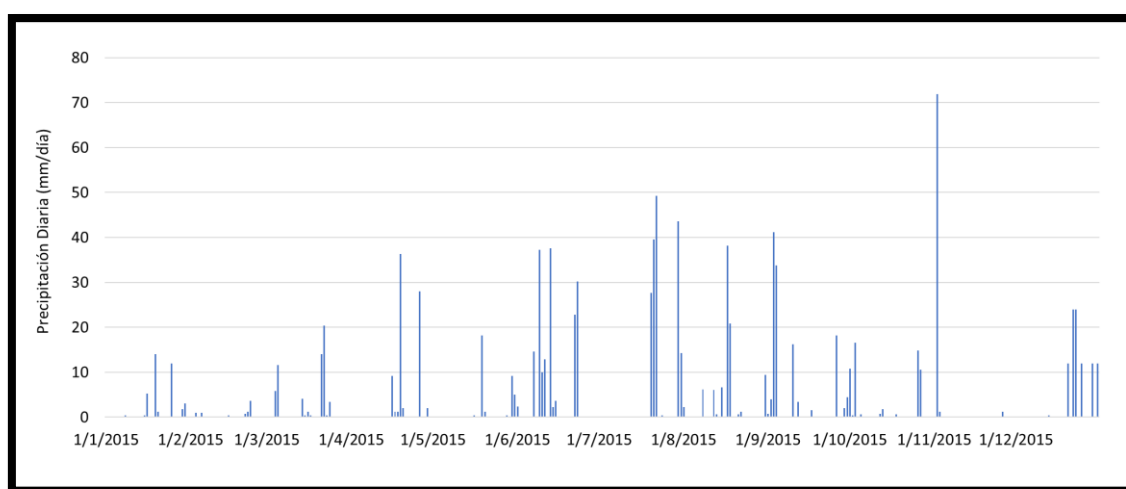


Figura 27. Precipitación diaria del año 2015

Este año 2015 tuvo una precipitación anual de 1023.27 mm/año, la mayor cantidad registrada de los tres años de estudio (2015-2017). Asimismo, en este año se registró tanto la más alta intensidad diaria como la horaria de los tres años. A pesar de tener episodios de lluvias muy intensos, este año fue en su mayoría seco.

Los sensores en este año respondieron de forma rápida a las precipitaciones y sabiendo que el coluvión está compuesto por una matriz arcillosa, se puede notar el grado de fisuración que posee el terreno permitiendo el paso del agua. Antes de entrar en el análisis de episodios, se analizará el comportamiento de cada uno de los parámetros de succión, contenido de agua y presión de agua a lo largo del año.

5.1.2. Contenido de agua

En el momento en que el agua se infiltra en el terreno, va llenando sus poros, aumentando así su contenido de agua. El contenido de agua permite saber el grado de humedad que posee un suelo. Este porcentaje de agua existente en el suelo se puede obtener tanto por peso (gravimétrico) como por volumen (volumétrico). Conocer este parámetro y la porosidad del suelo, permite obtener el grado de saturación presente en el terreno y de esta forma saber si se encuentra saturado o no.

Es importante tener conocimiento sobre el grado de humedad del suelo, debido a que como lo expresa (González de Vallejo et al., 2002) el agua en el terreno desarrolla un rol muy negativo, en donde no sólo reduce la resistencia al corte del material, sino que también aumenta los esfuerzos de corte (fuerzas desestabilizadoras) al aumentar el peso propio del terreno.

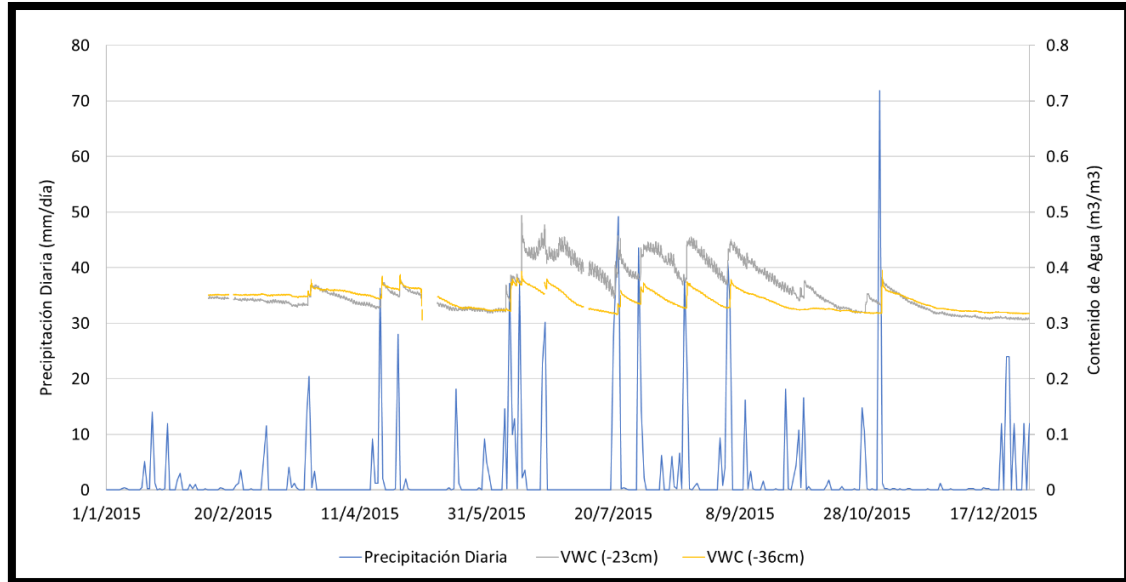


Figura 28. Comportamiento del contenido de agua ante las precipitaciones diarias del año 2015

Como se mencionó anteriormente, en este año sólo existían estos dos sensores (-23cm y -36cm). Al observar la Figura 28 se puede apreciar que los episodios de mayor intensidad de lluvia son los que generan cambios en los registros de ambos sensores. Asimismo, el sensor de contenido de agua (-23cm), al estar más cerca de la superficie es más propenso a sufrir mayores cambios (Villarraga Díaz, 2014). Además, se observa que los mayores cambios en cada sensor se producen finalizando la primavera hasta entrando el otoño. Este hecho se debe a que es la etapa del año más seca y por tanto mientras menos agua posea el suelo más fácil es aumentar su contenido de agua.

La respuesta de cada sensor ante los episodios es realmente rápida, dando una idea de que tan intensos fueron los episodios. Independientemente de que la porosidad de cada capa de suelo que envuelve a los sensores sea diferente, ambos experimentan incrementos apreciables ante los episodios más intensos de lluvia.

5.1.3. Succión

A medida que aumenta el contenido de agua de un suelo por la infiltración de la lluvia, se va perdiendo la succión que existía en él. Para épocas de verano el suelo posee más succión debido a la alta temperatura que existe en él, debido a que se logra evaporar el agua contenida en su interior. En adición a esto, en estas épocas se registran menos cantidades de precipitaciones por lo que se experimentan varios días o semanas en las que no cae una gota de agua, dando lugar a que la succión aumente.

En suelos arcillosos se generan succiones más importantes que en suelos granulares debido a que el tamaño de sus poros es más pequeño (Gómez Méndez, 2008).

Para la zona de estudio se registró la succión anual del 2015 y se muestra en la Figura 29.

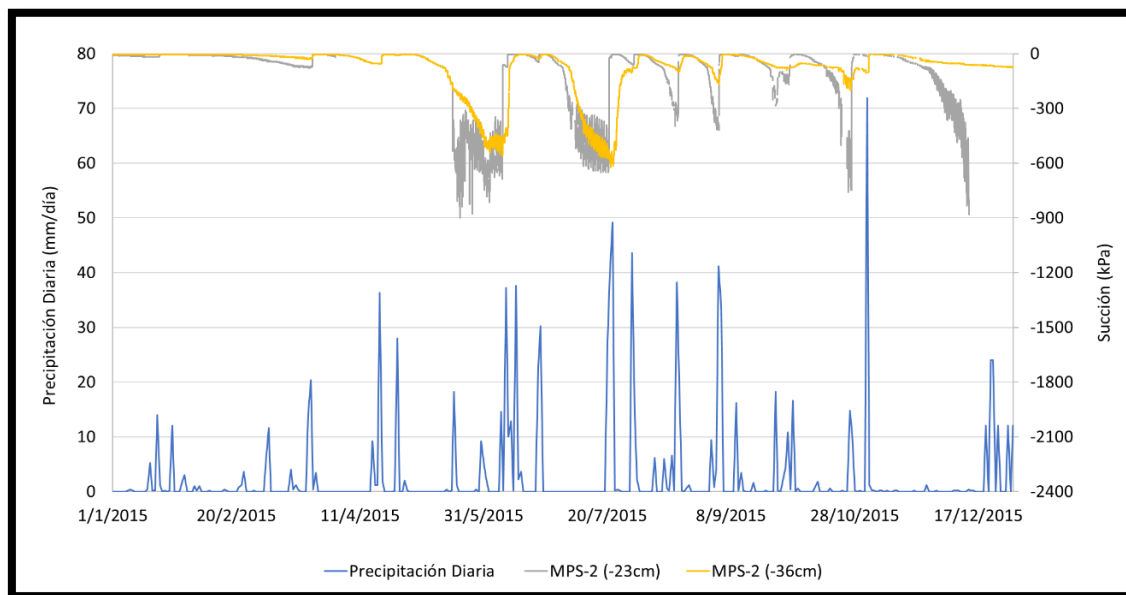


Figura 29. Comportamiento de la succión ante las precipitaciones diarias del año 2015

Como se mencionó anteriormente, se observa que para las épocas más seca del año la succión incrementaba significativamente, alcanzando valores importantes. Se aprecia también como el sensor de succión más superficial, experimenta más fluctuaciones que el más profundo, registrando medidas más altas de succión y reaccionando más rápidamente a una pérdida de succión debido a las intensas precipitaciones.

Los parámetros de contenido de agua y succión permiten establecer una relación entre ellos para observar el comportamiento del terreno ante un proceso de “secado” y “mojado” en donde se aprecia como aumenta el contenido de agua y disminuye la succión y viceversa. La capacidad de un terreno de retener agua varía con el tamaño de sus partículas, en donde para una arena es menor la cantidad de agua que puede retener y para una arcilla es mayor.

Con los datos mencionados se traza una curva de retención (Figura 30) y se analiza la habilidad del terreno de retener agua en su interior. Los datos se han dividido por épocas para poder distinguir la transición entre el invierno-verano (período de secado) y verano-invierno (período de humectación).

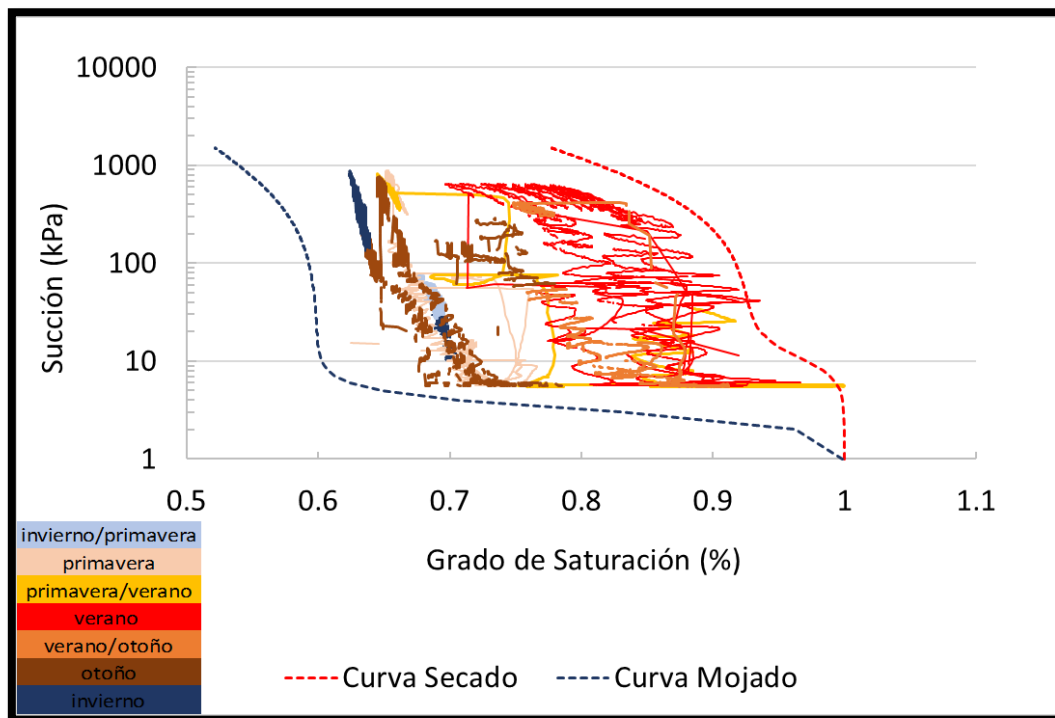


Figura 30. Curva de retención para los sensores (-23cm) del año 2015

En la figura anterior se observa que el terreno no disminuyó significativamente su contenido de agua, registrándose valores de grado de saturación por encima del 60%. Sin embargo, sí se distingue como varía significativamente la succión en cada época. Asimismo, se puede interpretar que se presenta el fenómeno de Histéresis en donde el terreno en proceso de humectación presenta menores valores de contenido de agua que en el proceso de secado, para el mismo valor de succión.

Los sensores de mayor profundidad (-36cm) describieron un comportamiento similar mostrado en la Figura 31. Primeramente, es evidente que el terreno a 36cm de profundidad se mantuvo prácticamente húmedo, alcanzando valores mínimos de grado de saturación de 0.75. En general se observa que se registraron grandes valores de succión, pero muy poco cambio en el grado de saturación.

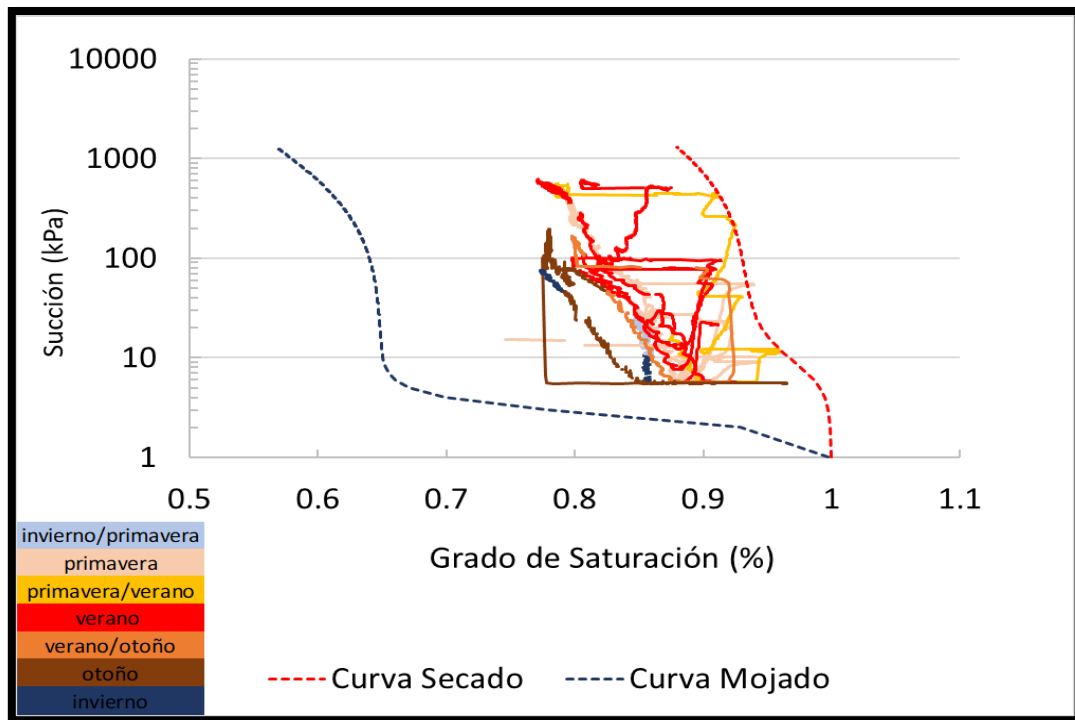


Figura 31. Curva de retención para los sensores (-36cm) del año 2015

5.1.4. Presión de agua

Como se había mencionado anteriormente, la presencia de agua en el terreno ejerce un papel negativo en el terreno. El agua ejerce una presión que separa las partículas sólidas del terreno disminuyendo así su resistencia al corte. Para medir la presión del agua se instaló un piezómetro y su registro anual del 2015 se puede observar en la Figura 32.

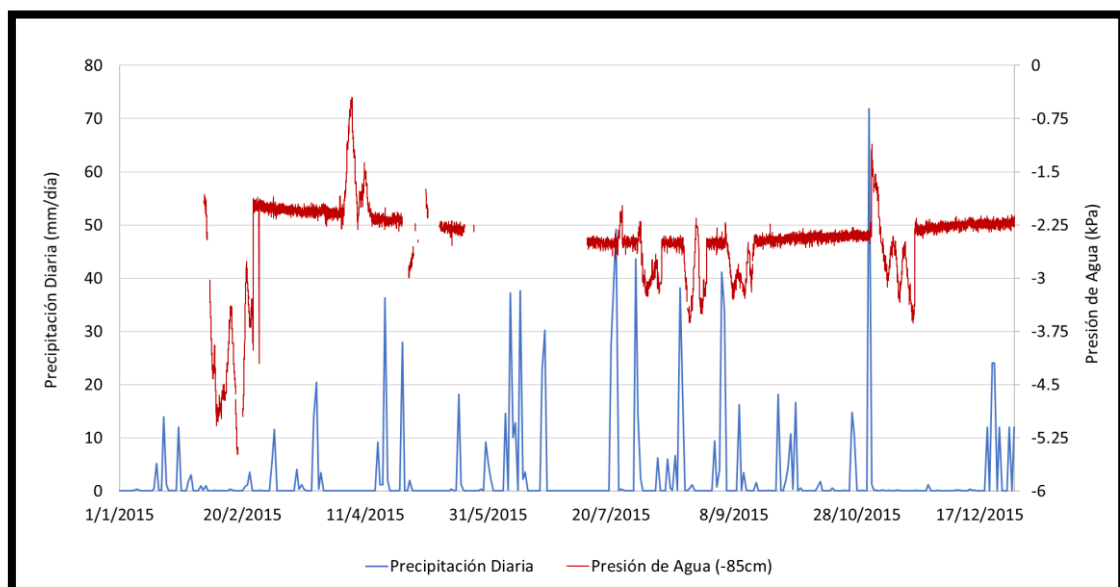


Figura 32. Comportamiento de la presión de agua ante las precipitaciones del año 2015

Como se muestra en la figura anterior, las precipitaciones más importantes causaron cambios poco significativos en los registros.

A pesar de ser el año con mayor cantidad de precipitación, todas las medidas arrojadas por el piezómetro fueron por debajo de cero (presiones negativas). Hay ciertos incrementos registrados para períodos sin lluvias, que existe la posibilidad de que se deban a un flujo lateral de aguas subterráneas que afecta directamente al piezómetro.

5.1.5. Temperatura del suelo

Los sensores de succión (MPS-2) y el piezómetro también registran la temperatura del suelo como se muestra en la Figura 33. Se puede observar que no se registraron temperaturas extremas a lo largo de todo el año, siendo la máxima de 31.9°C en el mes de julio y una mínima de 2.1°C en el mes de febrero. Asimismo, se puede apreciar que mientras aumenta la profundidad la temperatura experimenta menos fluctuaciones logrando mantenerse más constante.

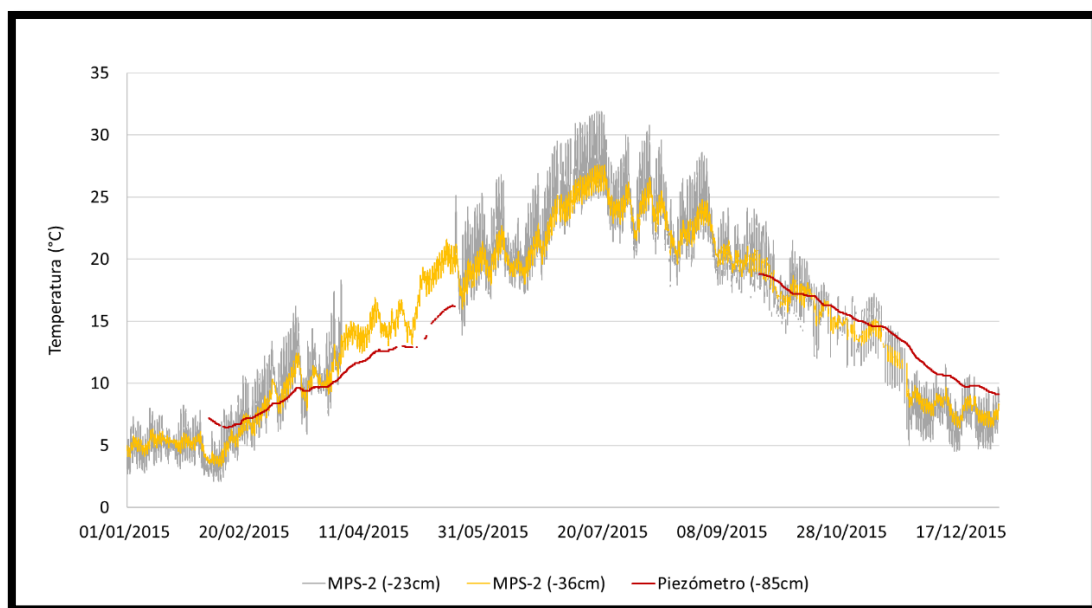


Figura 33. Comportamiento de la temperatura del suelo del año 2015

5.1.6. Temperatura del aire

Como se describió en el capítulo anterior, en la estación METEO se cuenta con un sensor que registra la temperatura del aire. Los datos de temperatura para el año 2015 se muestran en la Figura 34.

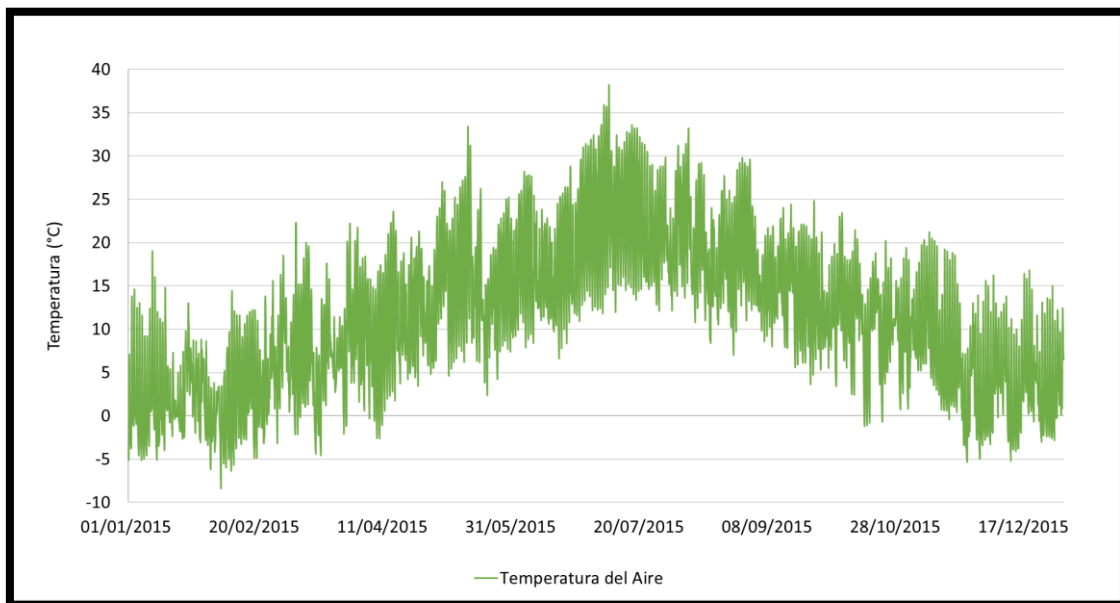


Figura 34. Comportamiento de la temperatura del aire del año 2015

En la figura anterior se observa que el comportamiento de la temperatura del aire fue parecido al del suelo (Figura 33). Asimismo, se interpreta que la temperatura del aire varía mucho en poco tiempo, a diferencia de la temperatura del suelo que sufre menos variaciones. Para los meses más cálidos se alcanzaron temperaturas por encima de los 30°C y para los meses de invierno, temperaturas bajo 0°C. En este año se registró la temperatura más alta de los tres, la cual fue de 38.2°C en el mes de julio.

5.2. Análisis puntual 2015

5.2.1. Episodio de máxima precipitación diaria

El día 2 de noviembre del año 2015 se registró no sólo el mayor registro de precipitación del año, sino de los tres años en estudio. Con una precipitación diaria de 71.86 mm, este episodio provocó cambios significativos en los registros de los sensores de la zona.

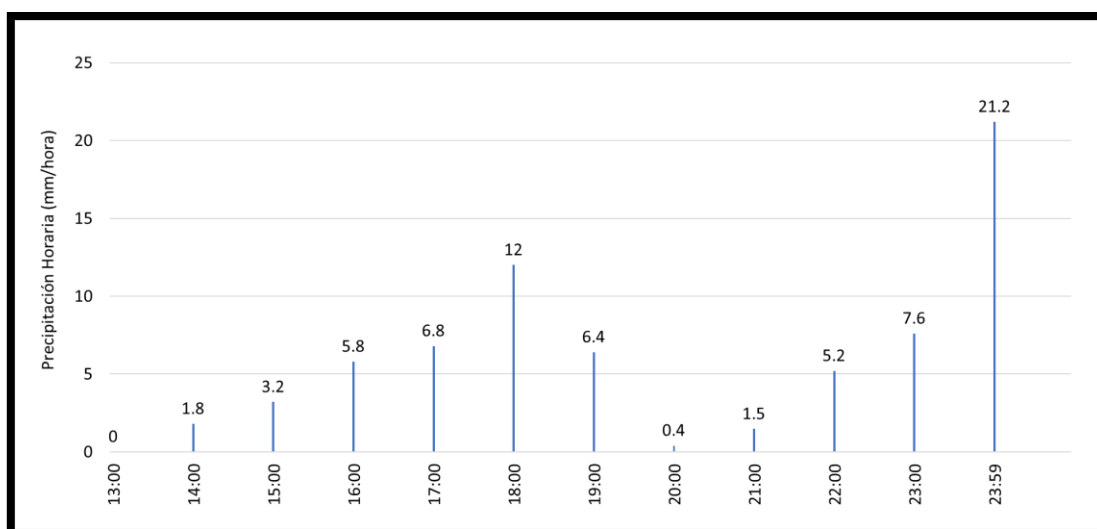


Figura 35. Máxima precipitación diaria del año 2015

Como se muestra en la Figura 35, fue un episodio de alta intensidad diaria el cual alcanzó su máxima precipitación horaria al final del día. A continuación, se analizan las respuestas de cada sensor ante este episodio de lluvia.

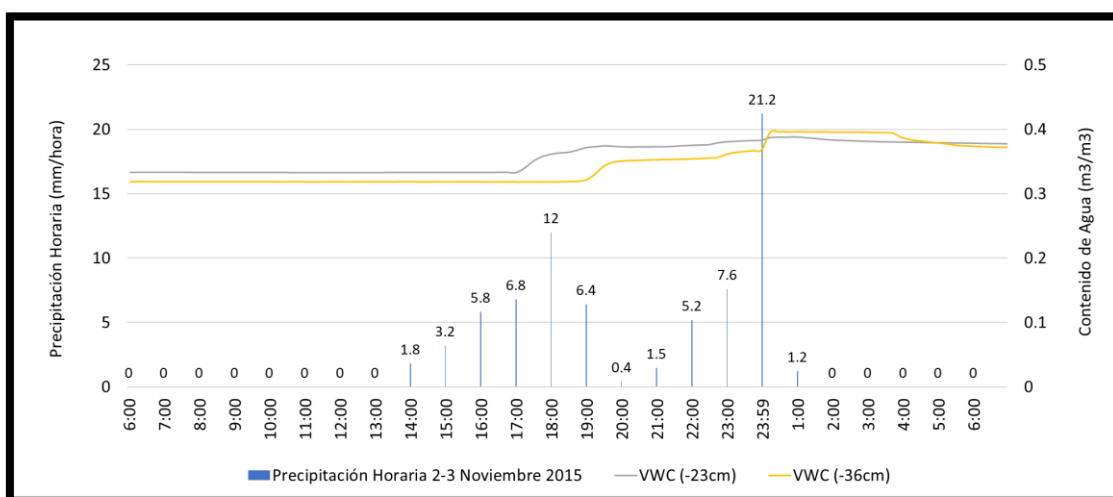


Figura 36. Comportamiento del contenido de agua ante las precipitaciones del 2 de noviembre del 2015

En la Figura 36 se muestra la respuesta de ambos sensores de contenido de agua, en donde se puede apreciar que el sensor más superficial responde rápidamente (3 horas) según va aumentando la intensidad de la lluvia. El sensor más profundo también presenta una respuesta rápida (5 horas) cuando las lluvias alcanzan una intensidad de 12 mm/hora.

Al final del día, luego de 10 horas en donde no paró de llover, se registra la máxima intensidad horaria del episodio (21.2 mm/hora) en donde el sensor (-36cm) registra de nuevo un incremento, observándose que este sensor responde más a episodios intensos de larga duración.

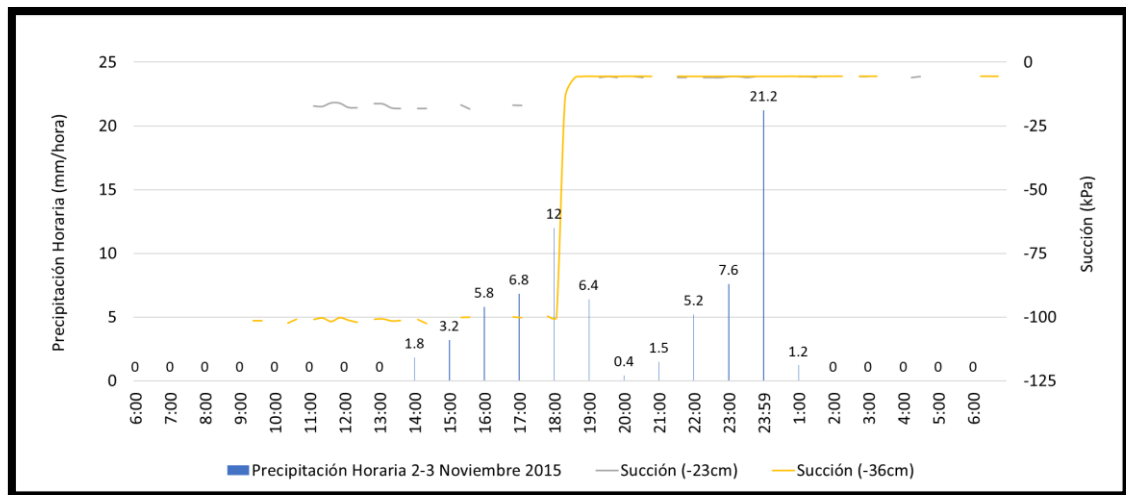


Figura 37. Comportamiento de la succión ante las precipitaciones del 2 de noviembre del 2015

Ante este episodio, la mayor respuesta es presentada por el sensor de mayor profundidad tal como se observa en la Figura 37. En el momento en que se registra la alta intensidad de lluvia de las 18:00h, el sensor de succión (-36cm) responde inmediatamente disminuyendo su registro de succión significativamente antes de las 19:00h.

La razón por la cual ocurre esto es debido a que se necesitan altas intensidades de lluvia para que el agua que se infiltra llegue a mayores profundidades, en donde el terreno va absorbiendo el agua desplazada de más arriba y se produzca una pérdida significativa en la succión.

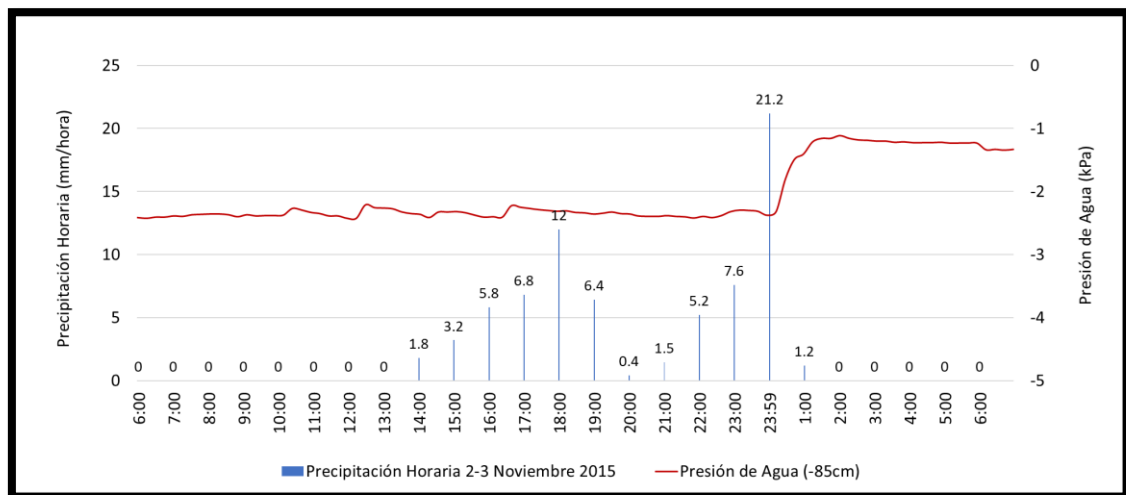


Figura 38. Comportamiento de la presión de agua ante las precipitaciones del 2 de noviembre del 2015

La respuesta del piezómetro ante este episodio se muestra en la Figura 38, en donde se registró un aumento de 1.31 kPa, el cual fue uno de los mayores aumentos de todo el año. Se puede apreciar el incremento de la presión de agua a partir de la mayor precipitación horaria del episodio. No obstante, esta medida alcanzada sigue ubicándose por debajo de cero.

5.2.2. Episodio de máxima precipitación horaria

El día 22 de julio del 2015 se registró la máxima precipitación horaria de los tres años. Este episodio de 44.2mm/hora se caracterizó por ser de corta duración (4 horas) en los que no se obtuvieron cambios significativos en los registros de los sensores de la zona.

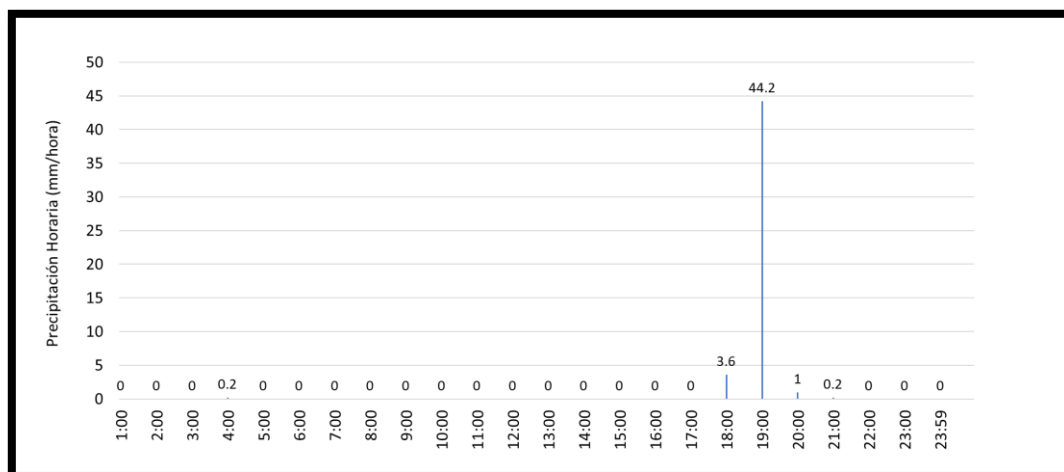


Figura 39. Máxima precipitación horaria del año 2015

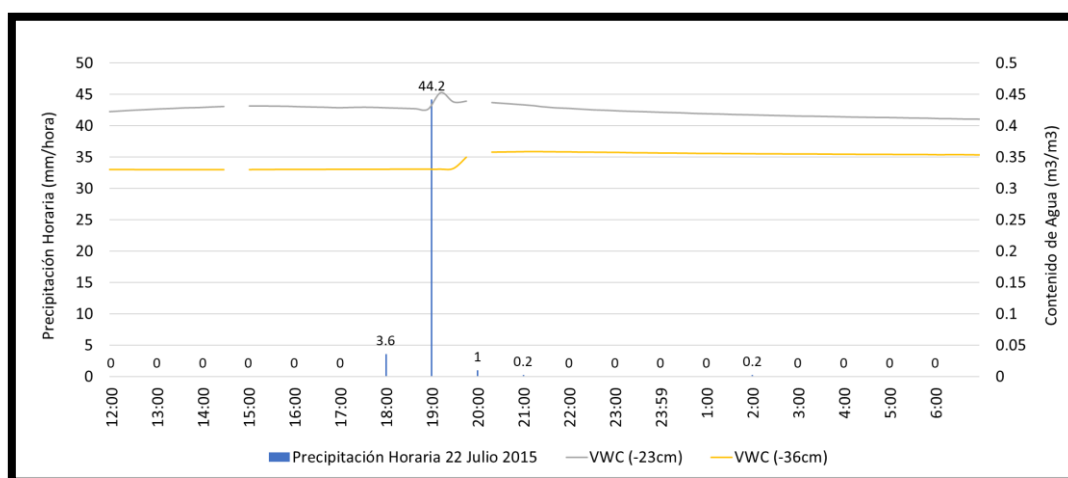


Figura 40. Comportamiento del contenido de agua ante las precipitaciones del 22 de julio del 2015

Como se muestra en la Figura 40 y como se comentó anteriormente, este episodio no generó grandes cambios en los registros de los sensores. Como se observa, ambos sensores de contenido de agua reaccionan ante la alta intensidad horaria logrando un ligero incremento en sus registros. El día anterior se registró una precipitación de 39.6mm/día por lo que el terreno se encontraba bastante húmedo.

Como el terreno que envuelve a ambos sensores es un coluvión, por su naturaleza heterogénea, la porosidad puede variar en cada punto.

Por esta razón el sensor de (-23cm) retuvo más agua de las precipitaciones anteriores y ante la alta intensidad horaria incrementó un poco más su contenido de agua.

El aumento del sensor de mayor profundidad se pudo deber a que ante la alta intensidad de lluvia, el agua que se infiltró en el terreno lograra desplazar hacia abajo cierta cantidad de agua que se encontraba retenida más arriba, logrando así un pequeño aumento.

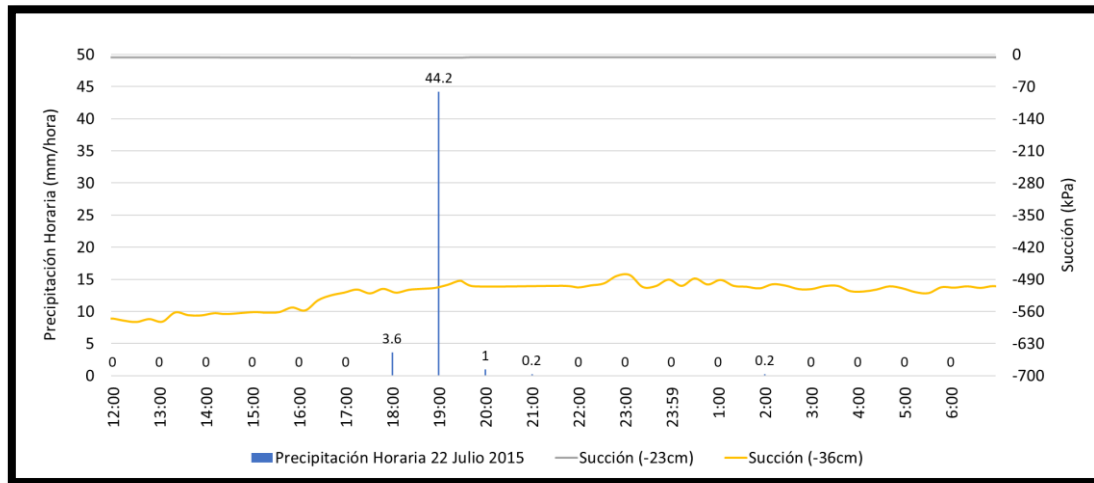


Figura 41. Comportamiento de la succión ante las precipitaciones del 22 de julio del 2015

En la Figura 41 se presenta el comportamiento de los sensores de succión ante la máxima precipitación horaria registrada. Se observa que el sensor más cercano a la superficie no presenta ningún cambio debido a que los sensores de succión instalados no registran medidas por debajo del mostrado (-5kPa). No obstante, se puede decir que el terreno se encontraba bastante húmedo a esa profundidad por las precipitaciones de los días 20 y 21 de julio de 27.6mm/día y 39.6mm/día respectivamente.

La succión del sensor de mayor profundidad no experimentó un cambio significativo por el episodio, posiblemente porque el agua que estaba retenida más arriba y que luego se desplazó hacia abajo no fue la suficiente como para provocar una pérdida importante de succión.

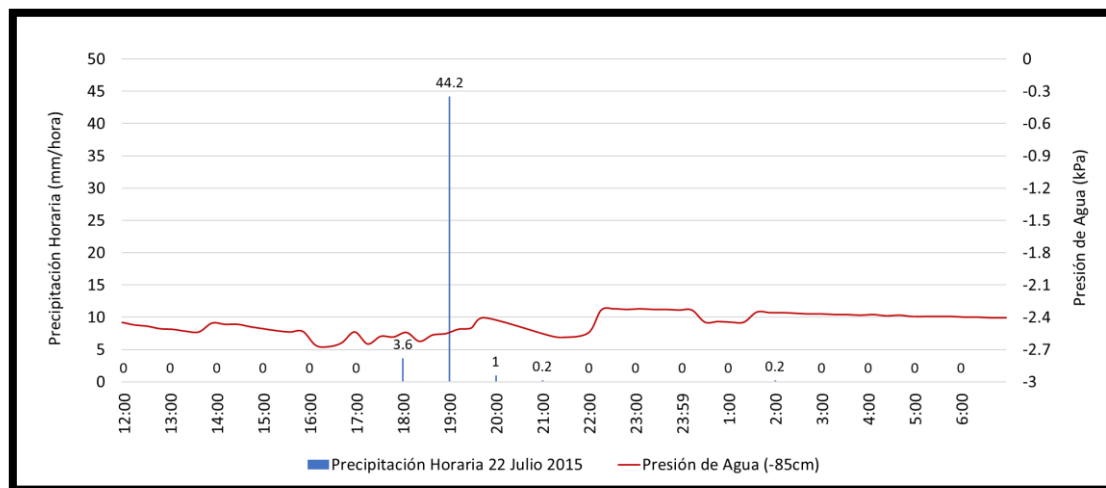


Figura 42. Comportamiento de la presión de agua ante las precipitaciones del 22 de julio del 2015

El registro de la respuesta de la presión de agua ante la alta intensidad horaria del 22 de julio del 2015 se muestra en la Figura 42. Este episodio ocurrió tan rápido que, a pesar de la alta intensidad, no logró afectar de manera significativa las lecturas tomadas por el piezómetro, mostrando un ligero incremento el cual es despreciable. Como se mencionó anteriormente, a pesar de experimentar episodios de muy altas intensidades, las medidas del piezómetro siempre fueron negativas durante todo el año.

5.3. Análisis global 2016

5.3.1. Precipitaciones

Las precipitaciones del año 2016 se muestran en la Figura 43.

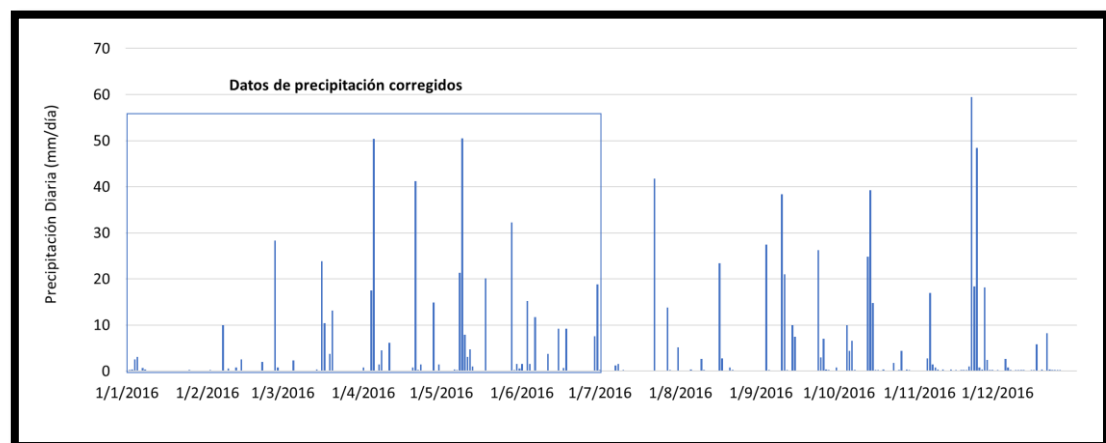


Figura 43. Precipitación diaria del año 2016

Este año 2016 experimentó fuertes episodios. La precipitación anual de este año fue de 1012.77 mm/año, un tanto menos que la del 2015 (1023.27 mm/año). Este fue el año con menos días secos (199 días) en comparación con los 232 días del 2015, demostrando que las lluvias del año anterior fueron más intensas.

Como se mencionó más arriba, no se poseían los primeros 6 meses de datos de las precipitaciones por lo que se procedió a realizar una extrapolación de datos a partir de datos pluviométricos del municipio Guardiola de Berguedá como se explicó en el acápite 4.2. Los datos corregidos de señalizan en la figura anterior.

5.3.2. Contenido de agua

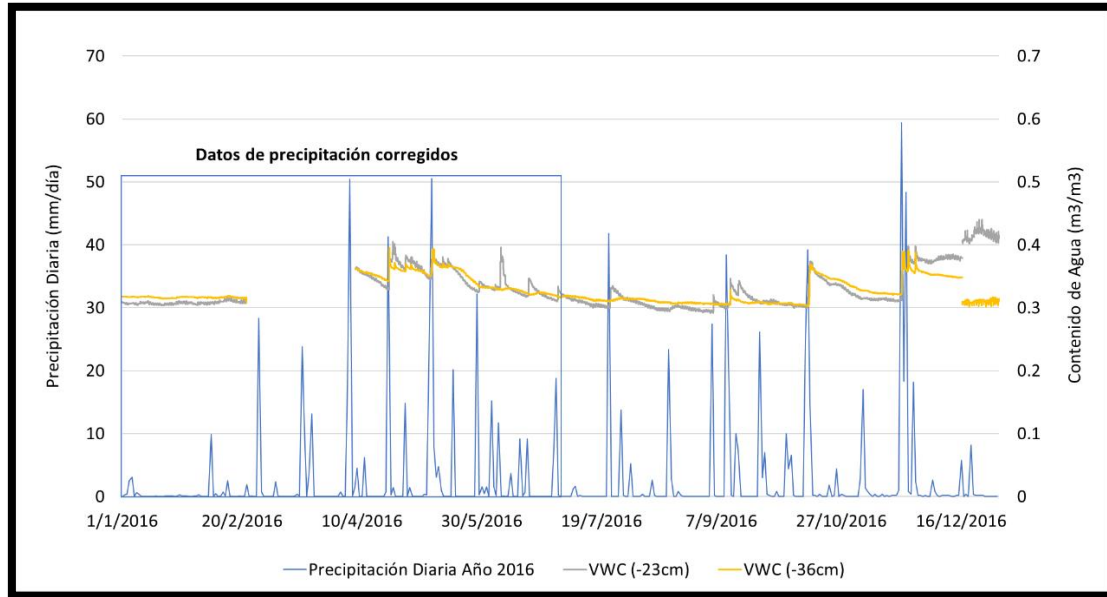


Figura 44. Comportamiento del contenido de agua ante las precipitaciones diarias del año 2016

Al igual que el 2015, en este año se contaba sólo con dos sensores de contenido de agua (-23cm y -36cm). Como se muestra en la Figura 44 el suelo presenta una respuesta rápida a los episodios más intensos de precipitaciones debido a la fisuración del coluvión.

Se observa como el sensor de contenido de agua más cercano a la superficie experimenta más incrementos en sus registros como en el año anterior. Los cambios producidos en este año son menores a los del 2015 en donde se alcanzaron valores cercanos a 0.5 m³/m³ para el sensor más superficial.

Debido a la extrapolación de datos realizada, ciertos cambios producido en los primeros 6 meses del año, son altos ante precipitaciones de baja intensidad. Esto se debe a que el sensor reaccionó a la precipitación real de la ladera de Cercs la cual en su mayoría es más intensa que la corregida.

Cabe mencionar que el 16 de diciembre del 2016 se instaló un nuevo sensor de contenido de agua a 11cm de profundidad, por lo que se cambiaron los canales a los cuales estaban conectados cada sensor en el nodo. Este cambio en la instrumentación produjo el salto en las curvas observado al final del año en la Figura 44.

5.3.3. Succión

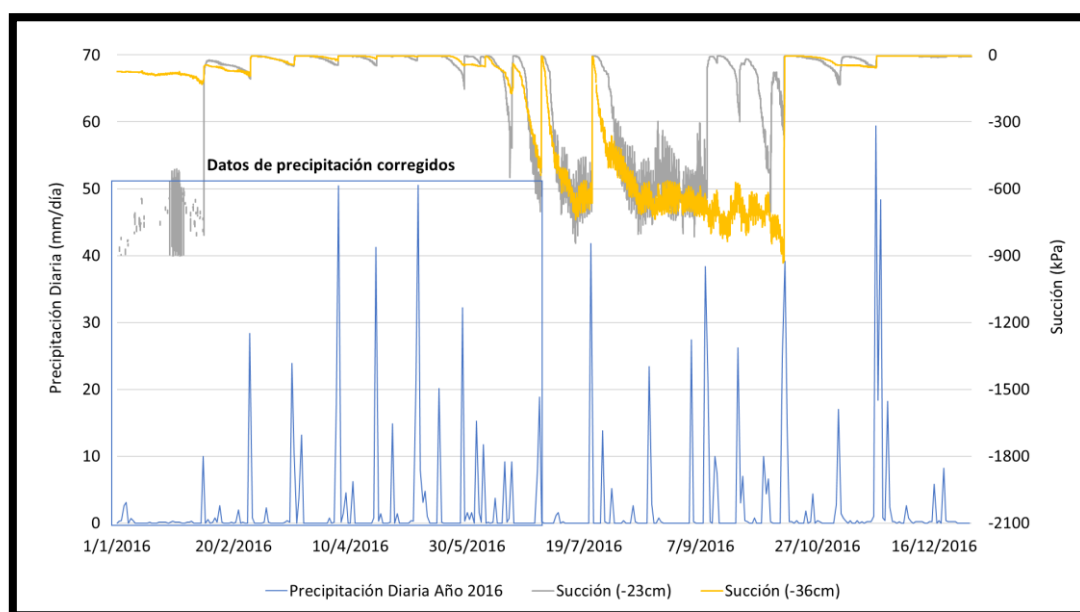


Figura 45. Comportamiento de la succión ante las precipitaciones diarias del año 2016

Como se había se explicó anteriormente, los datos de succión son más altos para las épocas más secas del año, justo como se muestra en la Figura 45. En comparación con el año anterior, en este año se registraron por más tiempo, valores de succión más elevados para ambos sensores.

En ciertas ocasiones, el sensor de mayor profundidad alcanzó valores de succión más altos que el de menor profundidad, posiblemente porque la capa que envuelve el sensor más superficial estaba reteniendo agua y las precipitaciones no fueron lo suficientemente intensas para lograr que el frente húmedo avanzara hacia abajo.

Al igual que en el 2015, para este año también se trazó una curva de retención para ambas profundidades (-23cm y -36cm), mostradas en la Figura 46 y Figura 47 respectivamente.

En el primer caso, se observa que la capa de terreno de menor profundidad no alcanzó la saturación durante el año completo. Su grado de saturación varió entre 0.6 y 0.8 aproximadamente. Sin embargo, sí se registraron grandes cambios de succión en el terreno, sin cambiar significativamente su contenido de agua. No obstante, se observa en el proceso de secado como el contenido de agua es mayor que en el proceso de mojado para el mismo valor de succión, tal como se presentó en las curvas de retención del año anterior.

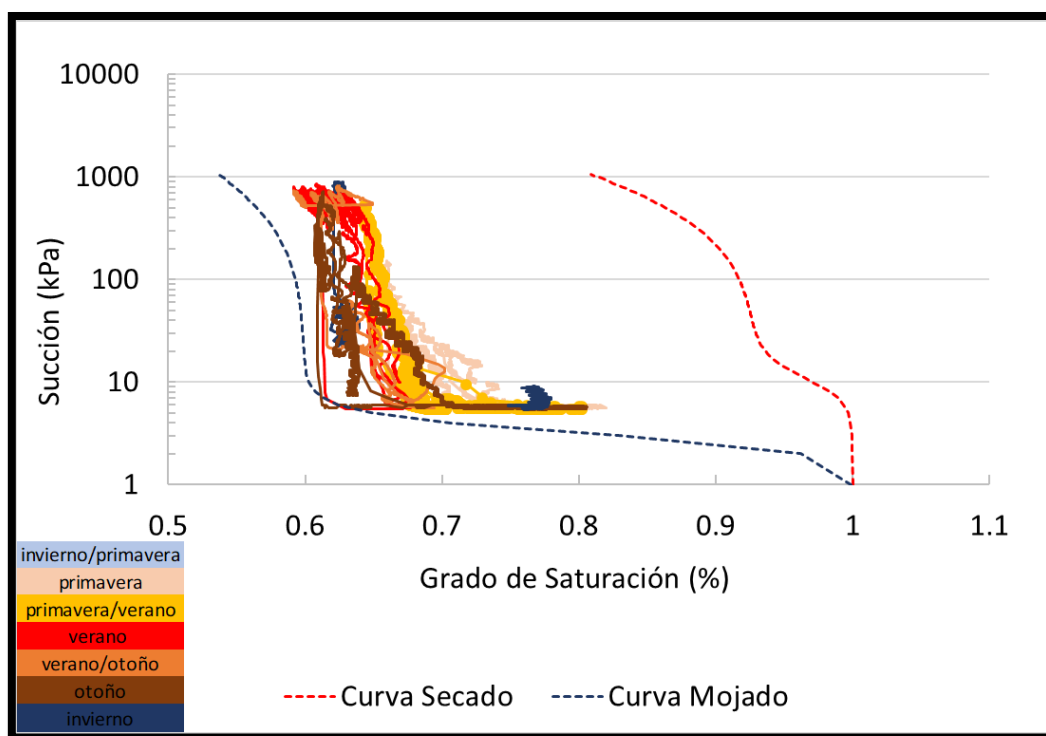


Figura 46. Curva de retención para los sensores (-23cm) del año 2016

En el segundo caso se aprecia que se registraron valores ligeramente inferiores de contenido de agua en comparación con el año anterior. Sin embargo, el comportamiento del terreno es muy similar en cuanto a los grandes cambios de succión que experimenta y a la vez manteniendo relativamente el mismo contenido de humedad en su interior.

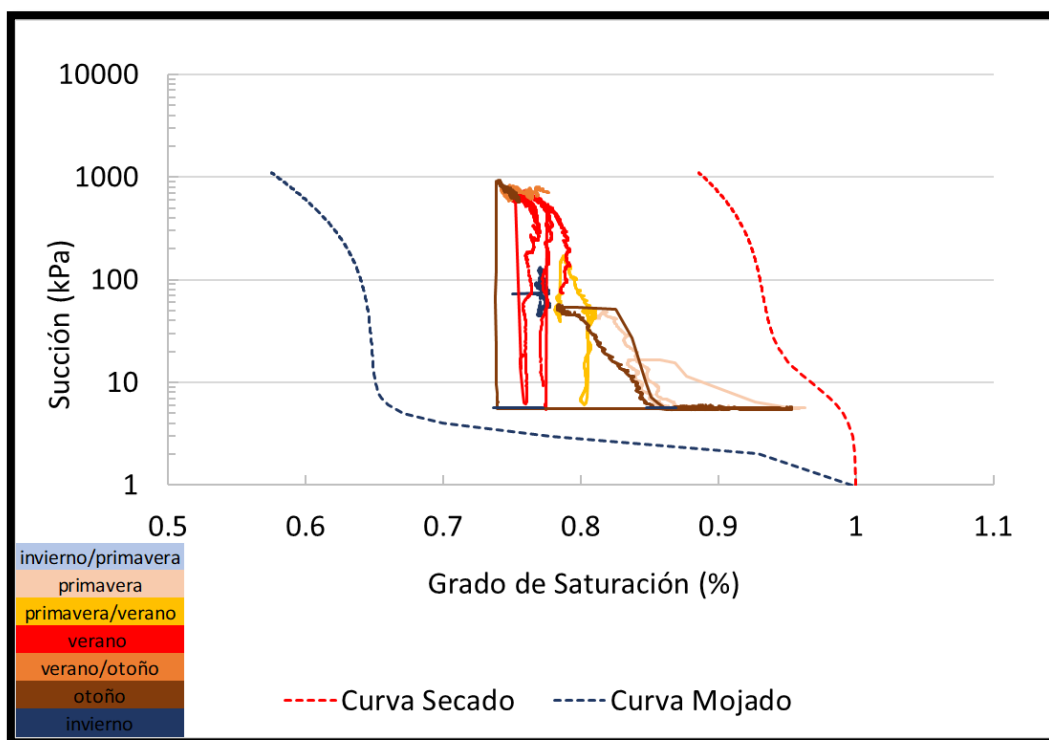


Figura 47. Curva de retención para los sensores (-36cm) del año 2016

5.3.4. Presión de agua

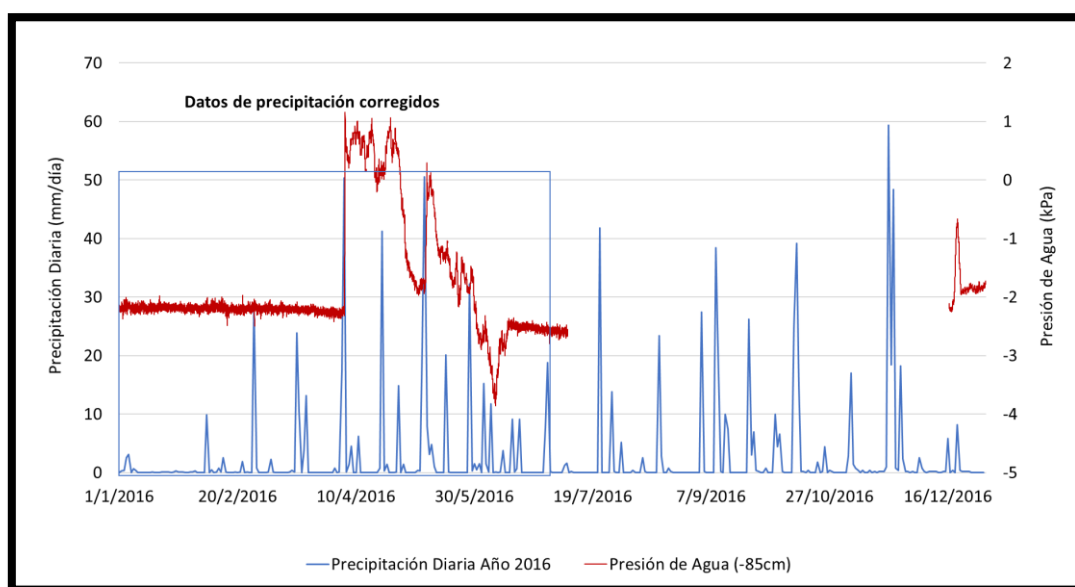


Figura 48. Comportamiento de la presión de agua ante las precipitaciones diarias del año 2016

A diferencia del año anterior, en este año sí se registraron presiones de agua por encima de 0, durante uno de los episodios más largos e intensos. Las presiones se mantuvieron positivas durante el mes de abril posiblemente por el flujo de aguas subterráneas que se había comentado anteriormente, el cual afecta directamente al piezómetro. Los registros de la presión de agua responden a los episodios de lluvia más intensos registrados.

En ciertas ocasiones, el piezómetro no tiene una respuesta rápida ante los episodios, a pesar del grado de fisuración presente en el terreno, posiblemente por el hecho que se comentó anteriormente de las precipitaciones corregidas, las cuales no son las que realmente sucedieron para los primeros 6 meses del año. Lamentablemente no poseen los datos de casi todo el segundo semestre del año por lo que no se pudo analizar el comportamiento de la presión de agua ante el episodio más intenso del año (21 de noviembre).

5.3.5. Temperatura del suelo

Para este año se cuenta con las medidas de temperatura del suelo arrojadas por el piezómetro las cuales se muestran junto a las de los sensores de succión en la Figura 49.

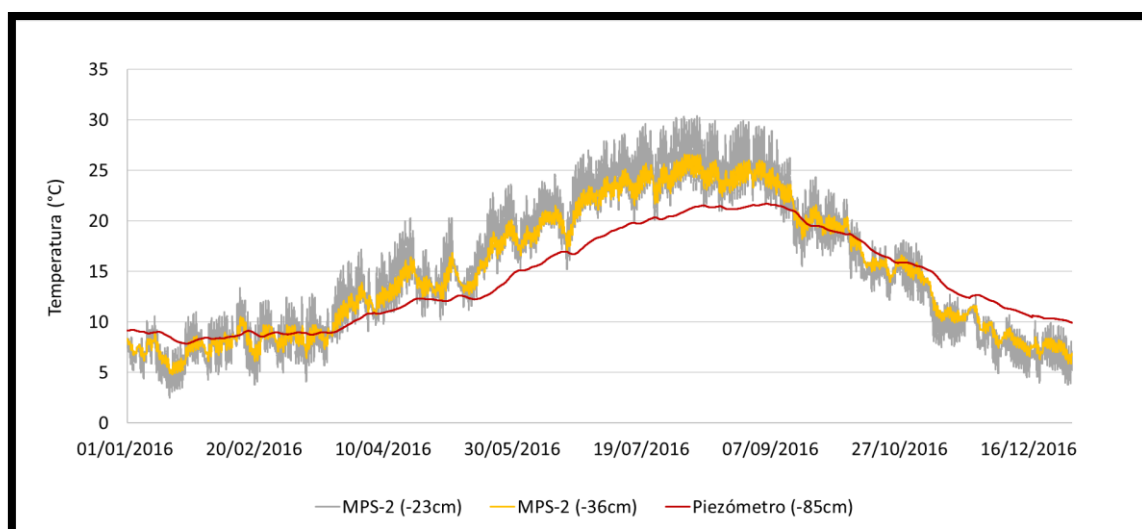


Figura 49. Comportamiento de la temperatura del suelo del año 2016

Este año se registraron temperaturas muy similares a las del año pasado con una máxima de 30.4°C y una mínima de 2.5°C igualmente para las épocas de verano e invierno respectivamente. En este análisis, al igual que el del 2015, se cuenta con los registros del piezómetro, los cuales certifican que a medida que aumenta la profundidad la temperatura sufre menos fluctuaciones.

5.3.6. Temperatura del aire

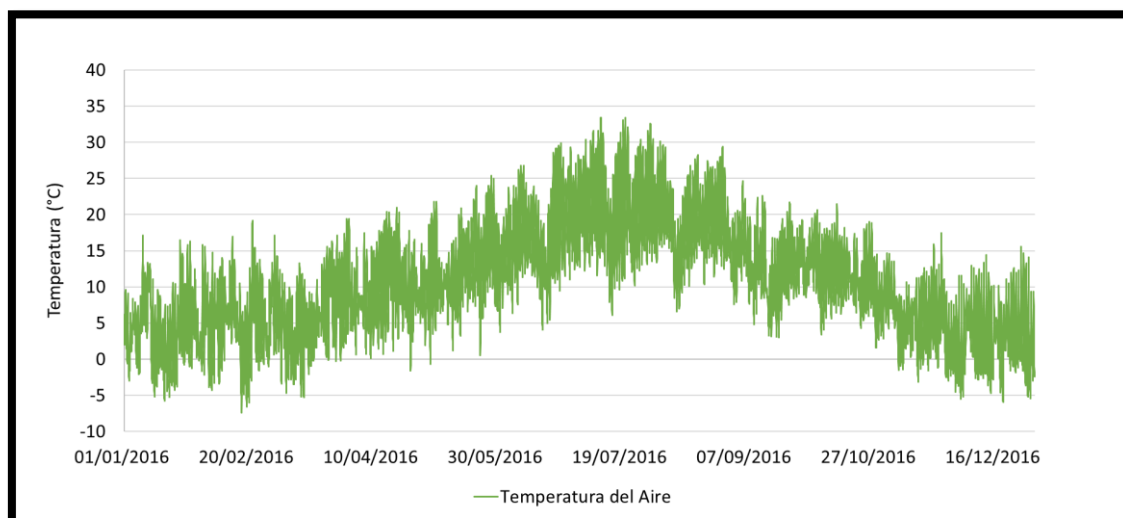


Figura 50. Comportamiento de la temperatura del aire del año 2016

En este caso faltaban los datos de agosto a noviembre por lo que se realizó una extrapolación de los datos del año 2017 al igual como se realizó para las precipitaciones. En general se observa el mismo comportamiento que el año anterior con grandes variaciones en comparación con la temperatura del suelo. Para los meses más cálidos se registraron temperaturas entre los 30°C y 33°C. Asimismo, se observan en el período de invierno prácticamente las mismas temperaturas que el 2015 (entre 0°C y -5°C).

5.4. Análisis puntual 2016

5.4.1. Episodio de máxima precipitación diaria

El episodio con mayor precipitación fue el ocurrido el 21 de noviembre en donde se registraron 59.4mm/día.

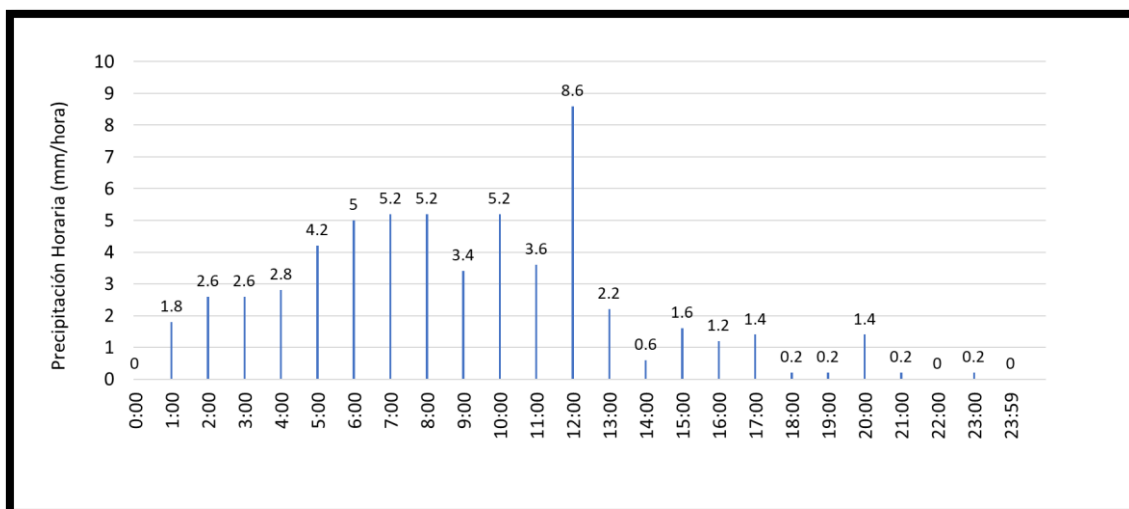


Figura 51. Máxima precipitación diaria del año 2016

En la Figura 51 se muestra con detalle el día de máxima precipitación diaria, en el cual sus lluvias se mantuvieron casi las 24 horas del día (episodio de larga duración). En comparación con el episodio de máxima precipitación diaria del 2015, el de este último fue más intenso pero el del 2016 tuvo una mayor duración.

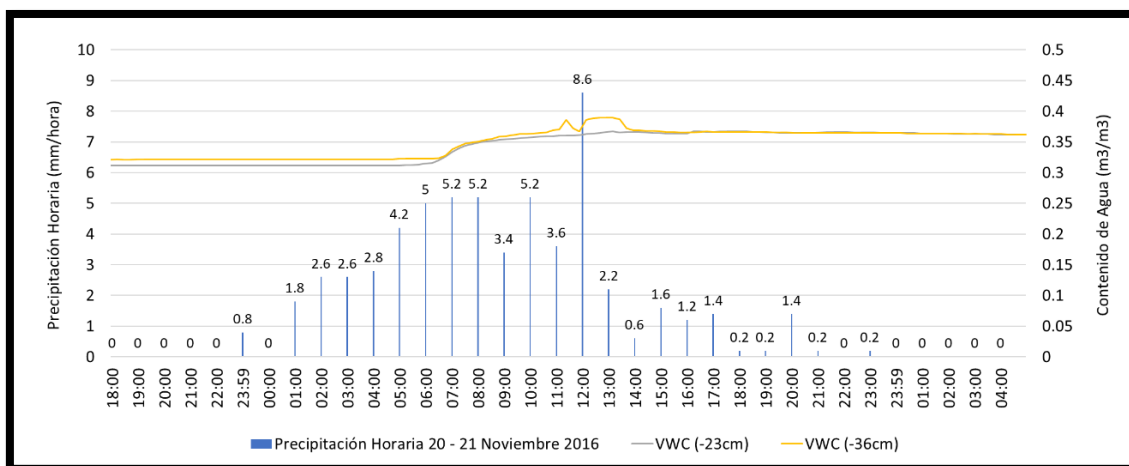


Figura 52. Comportamiento del contenido de agua ante las precipitaciones del 21 de noviembre del 2016

Como se observa en la Figura 52, ambos sensores de contenido de agua reaccionan al episodio de alta intensidad diaria como lo fue el del 21 de noviembre de 2016. El sensor más superficial reacciona un poco antes que el más profundo, pero ambos muestran el mismo incremento prácticamente.

Sin embargo, cuando aumenta un poco la intensidad de la lluvia, el sensor de (-36cm) responde con un mayor incremento en su registro. Una posible explicación sería que, al ser un episodio de prolongadas lluvias, el agua contenida en estratos superiores fuera descendiendo por gravedad hacia la capa que contiene al sensor (-36cm). Asimismo, al bajar la intensidad del episodio, el contenido de agua del sensor más profundo desciende a valores iguales al de menor profundidad (-23cm), observándose la rápida respuesta ante la reducción de la intensidad de lluvia.

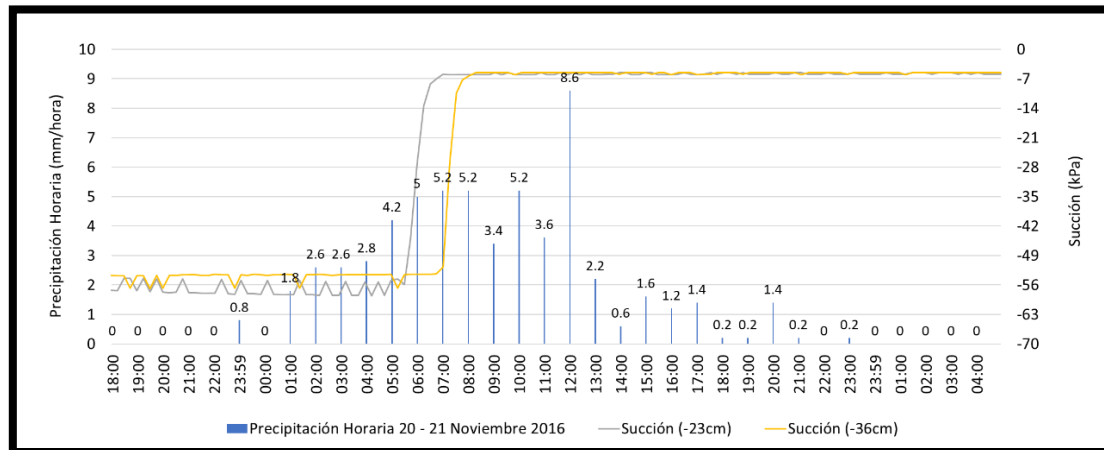


Figura 53. Comportamiento de la succión ante las precipitaciones del 21 de noviembre del 2016

En el caso del comportamiento de la succión mostrado en la Figura 53, se observa como el sensor de menor profundidad reaccionó primero ante el episodio de lluvia. Sin embargo, el sensor (-36cm) no tardó en reaccionar, alcanzando el mismo valor de succión (valor mínimo que mide el sensor). Asimismo, se logra apreciar que ambos sensores arrojan una respuesta ante episodios de alta intensidad diaria.

Desafortunadamente, como se mencionó más arriba, no se poseen registros del piezómetro para este episodio por lo que se analizó otro episodio en donde se registró el mayor valor de presión de agua alcanzado en este año.

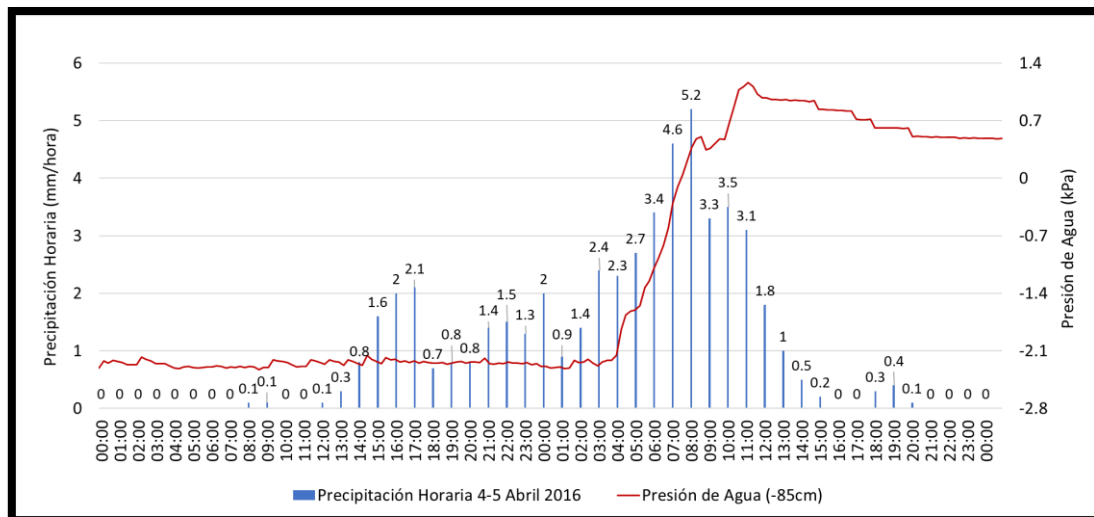


Figura 54. Comportamiento de la presión de agua ante las precipitaciones del 4-5 de abril del 2016

El episodio mostrado en la figura anterior fue uno de los de mayor duración en el que llovió casi por 1.5 días. Realmente no presentó altas intensidades horarias, sino que se caracterizó por ser un episodio de alta intensidad diaria. Se interpreta también que la presión de agua aumenta significativamente ante episodios intensos de larga duración. Como se mencionó más arriba, durante este episodio la presión de agua aumentó significativamente (3.47 kPa), alcanzando valores que no se habían registrado anteriormente.

5.4.2. Episodio de máxima precipitación horaria

El 28 de mayo de 2016 fue el episodio donde se registró la mayor cantidad de lluvia en una hora. Si se compara con el año anterior, en donde se registraron 44.2mm/hora, este del 2016 no fue tan fuerte. Este episodio forma parte de las precipitaciones corregidas mediante la extrapolación, por lo que se muestra un registro de precipitación que podría ser el que realmente ocurrió.

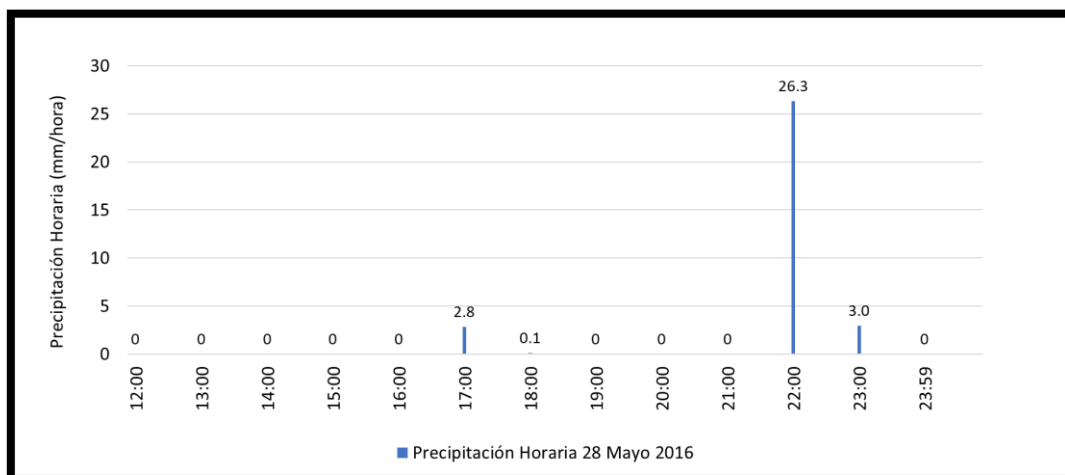


Figura 55. Máxima precipitación horaria del año 2016

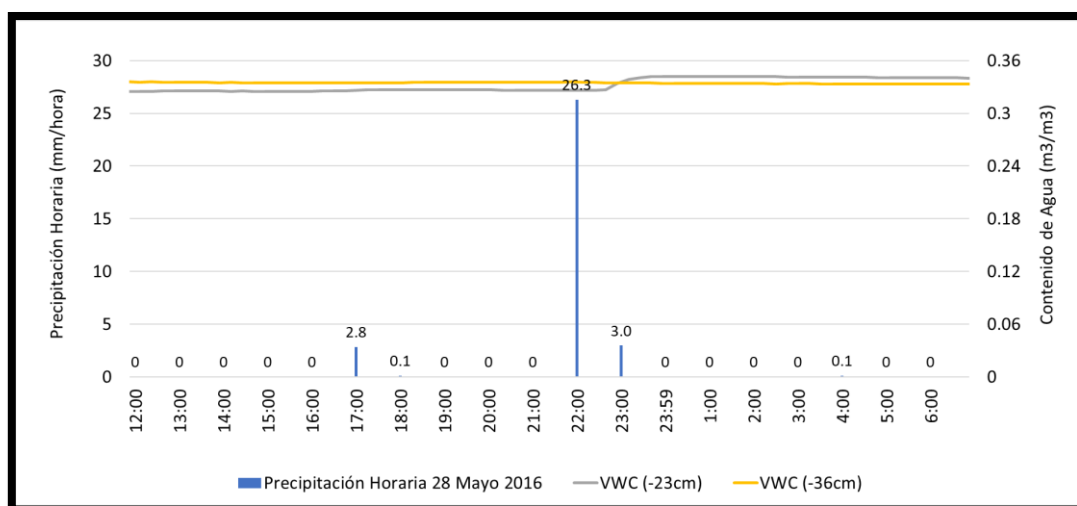


Figura 56. Comportamiento del contenido de agua ante las precipitaciones del 28 de mayo del 2016

En la figura anterior se aprecia como esta fuerte precipitación horaria obtuvo una respuesta despreciable por el sensor más superficial (-23cm) y una respuesta nula por el de mayor profundidad. Una posible explicación es que estos sensores no respondan fácilmente ante episodios de tan corta duración y de mucha intensidad. Asimismo, existe la posibilidad de que realmente el episodio de esta fecha fue diferente a este generado por las correcciones de precipitaciones.

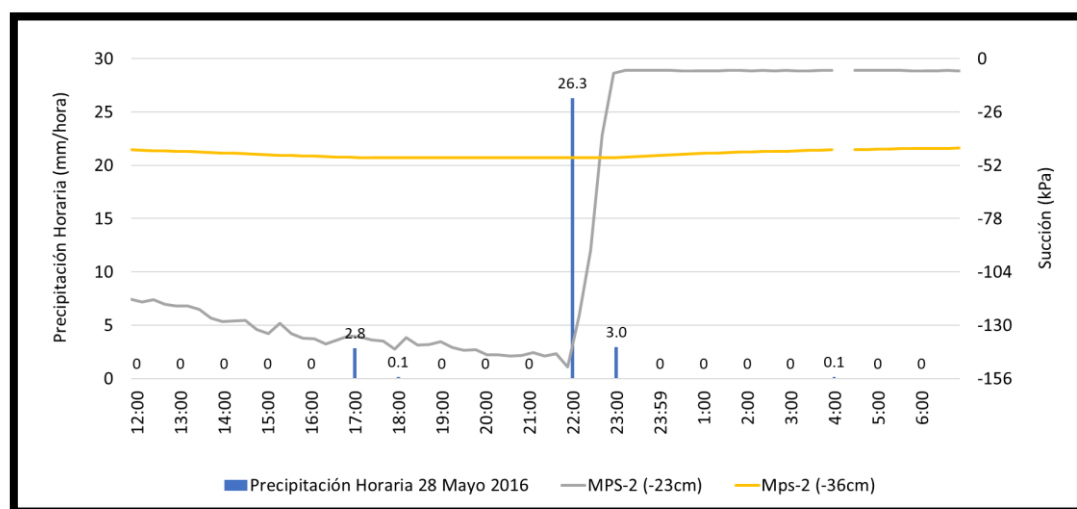


Figura 57. Comportamiento de la succión ante las precipitaciones del 28 de mayo del 2016

En el caso de los registros de succión mostrados en la figura anterior, el sensor de menor profundidad arroja una respuesta ante el episodio, alcanzando los valores mínimos de succión que miden los sensores. El sensor de mayor profundidad registró lecturas muy despreciables durante este episodio, observándose la respuesta del terreno ante episodios de muy altas intensidades y corta duración.

Los datos de la presión de agua ante este episodio se muestran en la Figura 58. Se observa como los registros del piezómetro muestran variaciones muy poco significativas, demostrándose la poca respuesta de este sensor a este tipo de episodios.

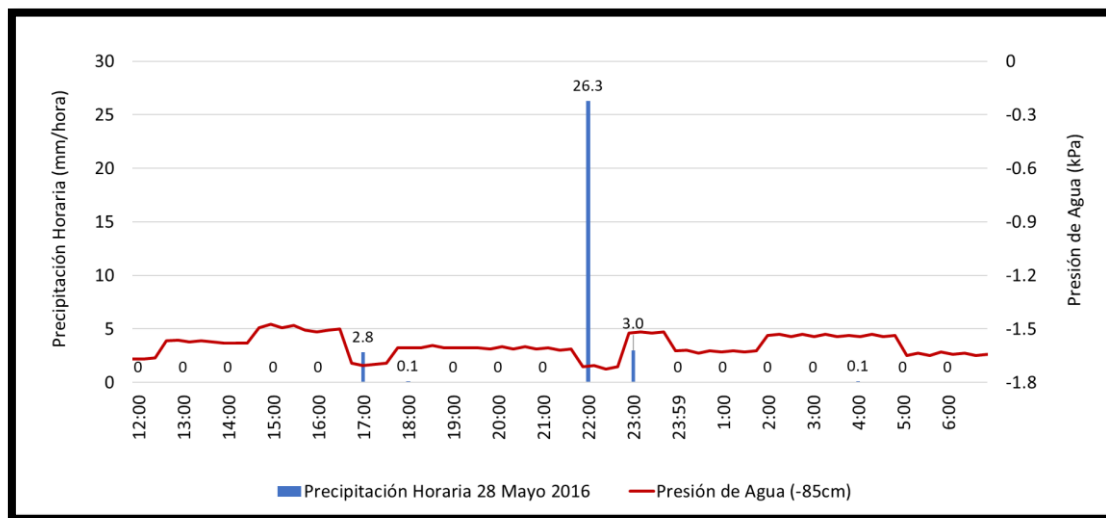


Figura 58. Comportamiento de la presión de agua ante las precipitaciones del 28 de mayo del 2016

5.5. Análisis global 2017

5.5.1. Precipitaciones

Al igual que en los años anteriores, se registraron las precipitaciones producidas en todo el año 2017 sobre la ladera de Cercs, con el fin de poder explicar el comportamiento de ésta. Al igual que en el año 2016, para este año también se realizó una extrapolación de los datos de precipitación, que abarcan desde el 30 de abril hasta el 22 de julio.

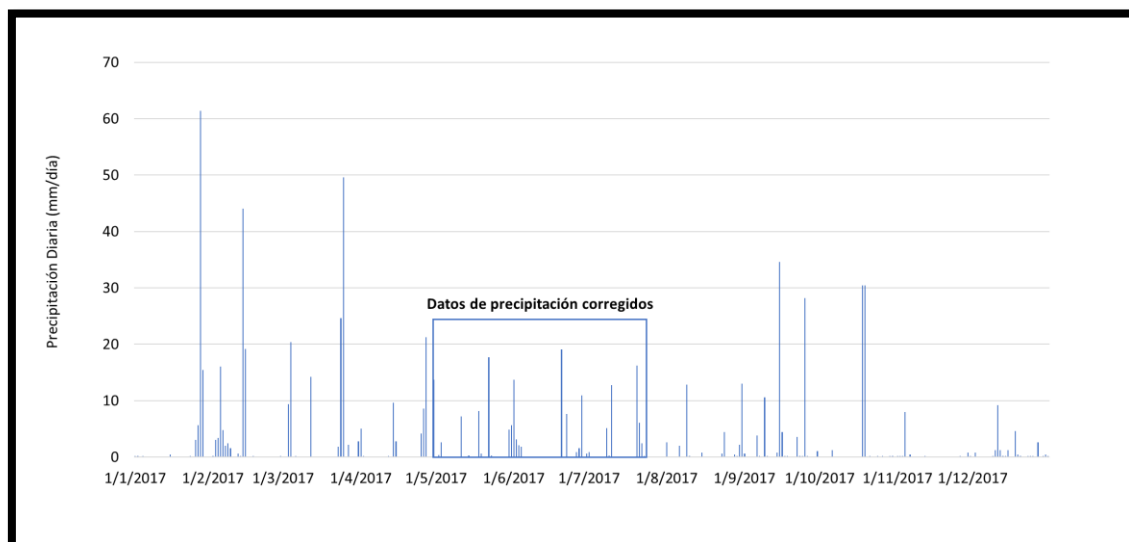


Figura 59. Precipitación diaria del año 2017

En la Figura 59 se puede observar como el año 2017 fue en su mayoría seco con excepción de algunos días donde se alcanzaron valores relativamente altos de precipitación. Se registró una precipitación anual de 753.9 mm/año, bastante menor a las precipitaciones de los años pasados (1023.27mm para el 2015 y 1012.77mm para el 2016). En este año no se registraron lluvias en 228 días, una cifra muy cercana a la del 2015 (232 días). No obstante, si se comparan las cantidades de lluvias entre los dos años (2015 y 2017) se nota claramente que los episodios registrados en este último año fueron significativamente menos intensos que el primer año.

5.5.2. Contenido de agua

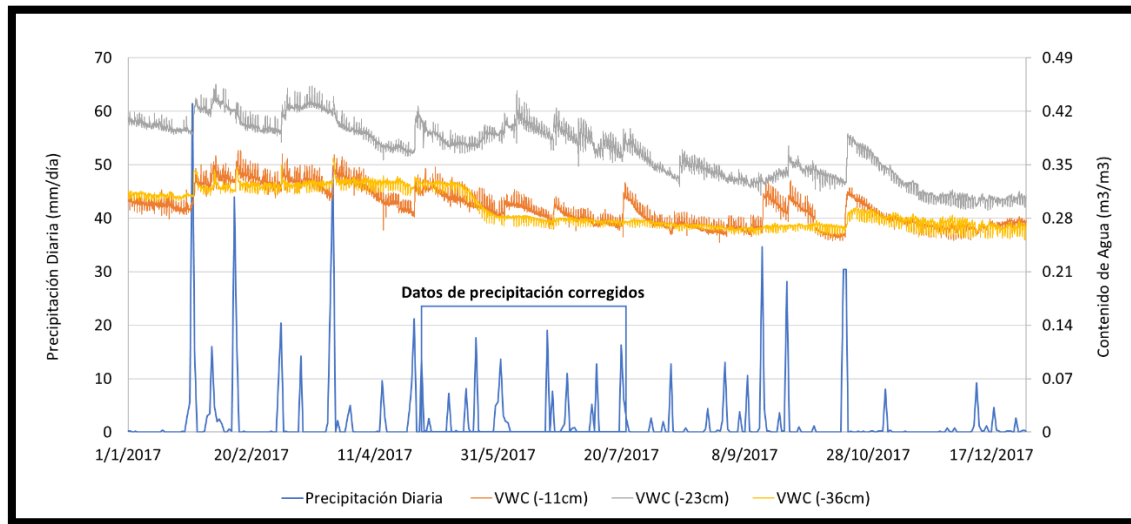


Figura 60. Comportamiento del contenido de agua ante las precipitaciones diarias del año 2017

Como se mencionó anteriormente, a finales del 2016 se instaló un nuevo sensor de contenido de agua muy cercano a la superficie (-11cm) por lo que a partir del año 2017 se cuenta con tres sensores cuyos registros se muestran en la Figura 60. En el caso de los datos del nuevo sensor de contenido de agua (-11cm), se aprecia que con menos intensidad de lluvias se producen ciertos incrementos.

El sensor de contenido de agua de (-23cm) se mantiene el año completo con valores más altos de humedad que los demás, posiblemente porque a esa profundidad la porosidad del suelo es muy diferente y tenga mayor capacidad de retener el agua en su interior. Los registros del sensor más superficial y los del de mayor profundidad fueron muy similares durante todo el año, a excepción de ciertos episodios que afectaron más a uno que al otro.

5.5.3. Succión

En la Figura 61 se muestran las respuestas de los sensores de succión para este año 2017.

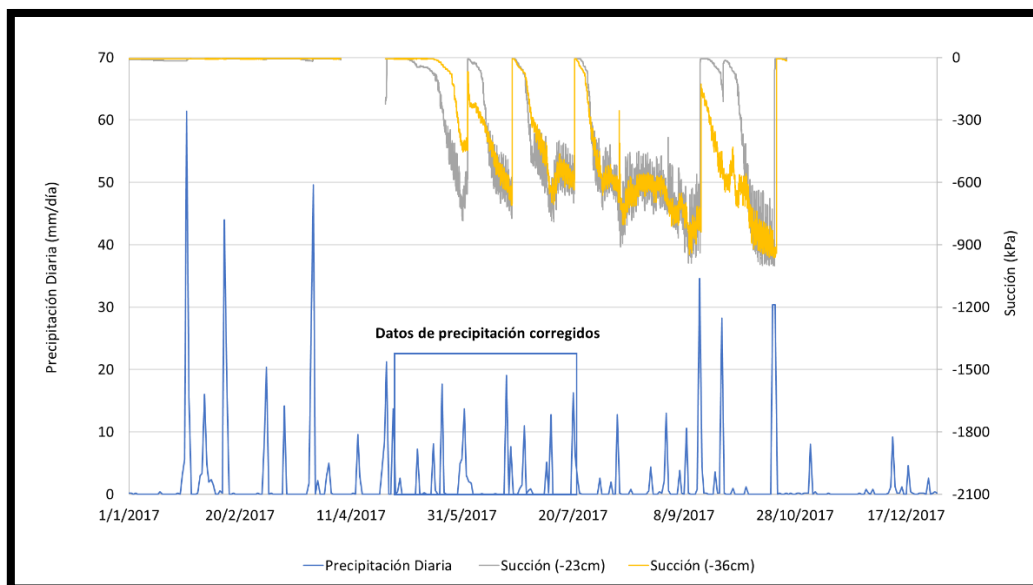


Figura 61. Comportamiento de la succión ante las precipitaciones diarias del año 2017

En este año se registraron mayores valores de succión que en años anteriores. Asimismo, se observa la rápida respuesta del terreno a disminuir la succión en su interior en ambas profundidades (-23 y -36cm).

La mayoría de los incrementos importantes en los registros del sensor más superficial, también se observaron en el sensor más profundo, mostrando respuestas muy parecidas. La mayor pérdida de succión en ambos sensores se da para el episodio de alta intensidad diaria del 18 al 19 de octubre.

Como en años anteriores, también se analizó la capacidad del terreno para retener agua en su interior ante los incrementos de succión. En la Figura 62 se muestra la curva de retención para los sensores de (-23cm) de profundidad.

La curva de retención de este año 2017 para los sensores más superficiales presenta un comportamiento parecido a los años anteriores. En ciertos casos se observan grandes cambios en la succión para relativamente el mismo valor de contenido de agua.

Esta capa más cercana a la superficie no llegó a saturarse completamente registrando valores de grado de saturación entre 0.65 y 0.9. Asimismo, al igual que en los años 2015 y 2016, se aprecian valores menores de contenido de agua en el proceso de mojado que en el de secado para el mismo valor de succión.

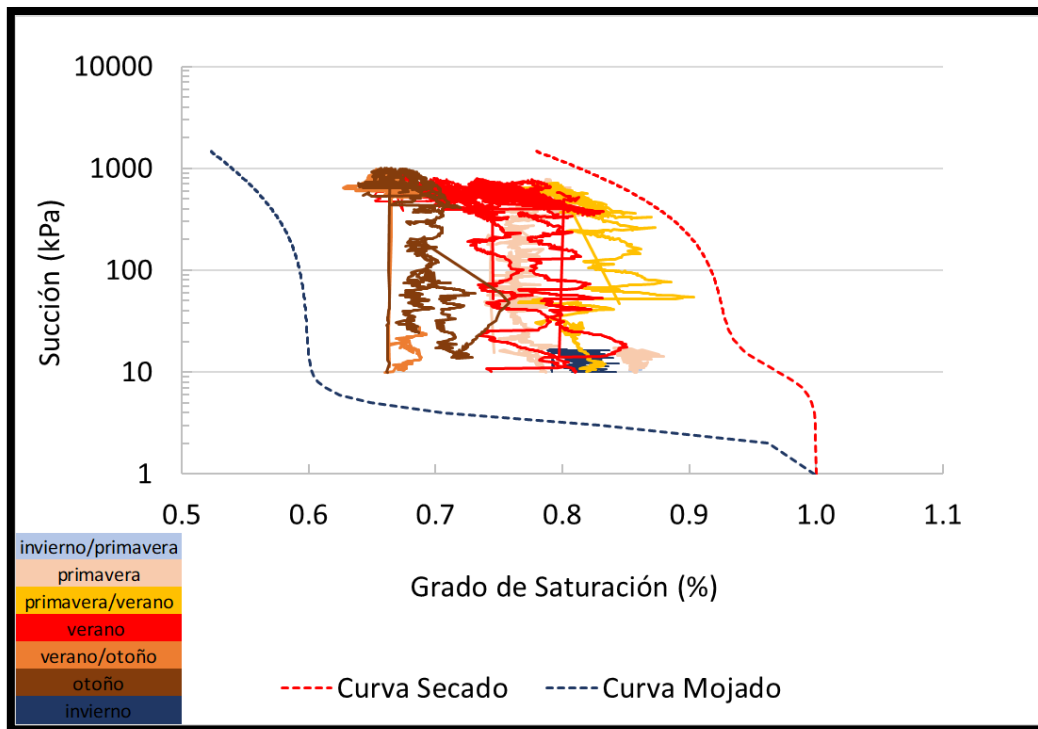


Figura 62. Curva de retención para los sensores (-23cm) del año 2017

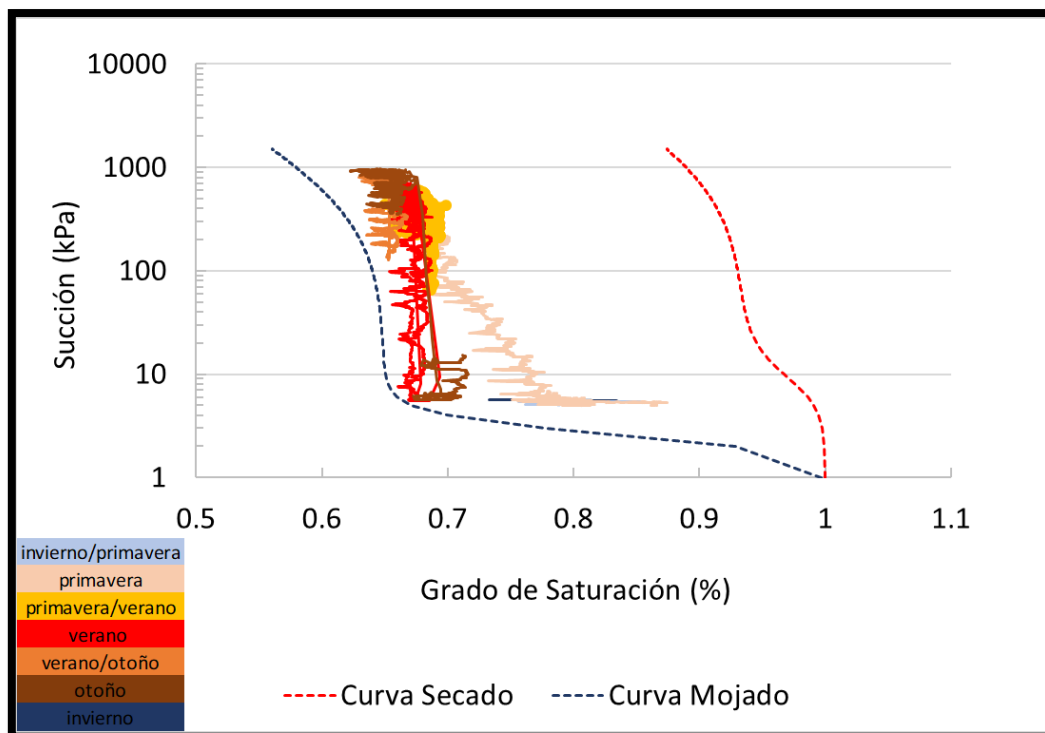


Figura 63. Curva de retención para los sensores (-36cm) del año 2017

En el caso de los sensores de mayor profundidad, su curva de retención se muestra en la figura anterior. En este caso se registraron los valores más bajos de contenido de agua para esta capa de terreno, los cuales fueron cercanos a 0.62.

Asimismo, se observa que no se alcanzó el máximo valor de grado de saturación, demostrando que los episodios de lluvia registrados para este año no fueron los suficientemente intensos como para saturar completamente el terreno. En general se aprecia el mismo comportamiento que en años anteriores en donde en ciertos casos varía significativamente la succión para prácticamente el mismo valor de contenido de agua.

5.5.4. Presión de agua

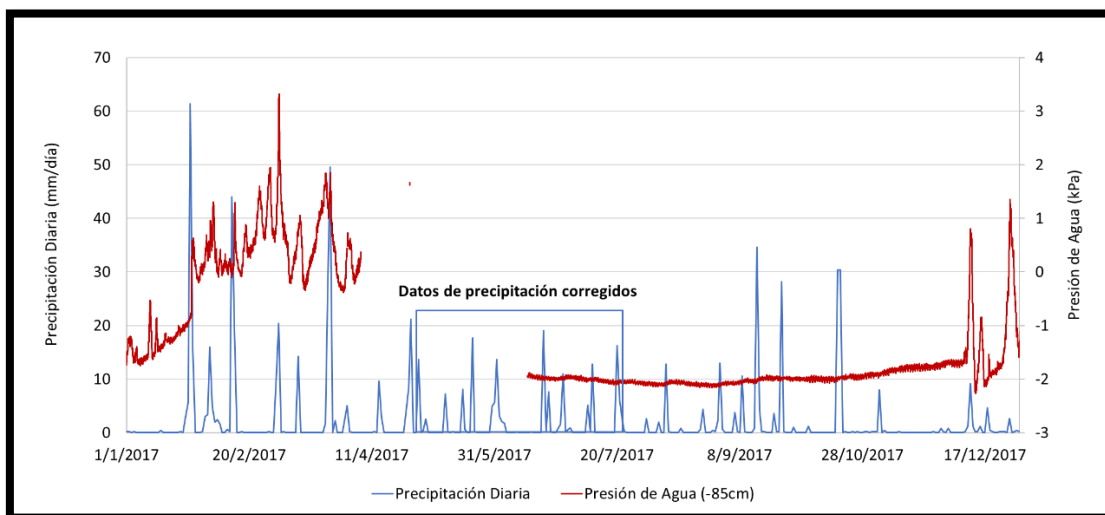


Figura 64. Comportamiento de la presión de agua ante las precipitaciones diarias del año 2017

En la figura anterior se muestra el comportamiento de la presión de agua de todo el año 2017. En este año se registró una presión de agua de 3.31 kPa, siendo la más alta de los tres años en estudio. Los aumentos significativos de la presión de agua se presentaron en entre el invierno y la primavera. A diferencia del 2016, donde también se registraron presiones positivas, las presiones de este año se mantuvieron por más tiempo por encima de 0.

Al igual que en todos los años se presentaron cambios en las lecturas en días en donde no se registraron precipitaciones. Como se había comentado antes, este hecho podría deberse a un flujo subterráneo de agua que influye en las lecturas del instrumento. Luego del hueco de dos meses en los que no se tienen registros, el sensor dejó de presentar cambios hasta el final del año en donde al parecer fue afectado por el flujo subterráneo.

5.5.5. Temperatura del suelo

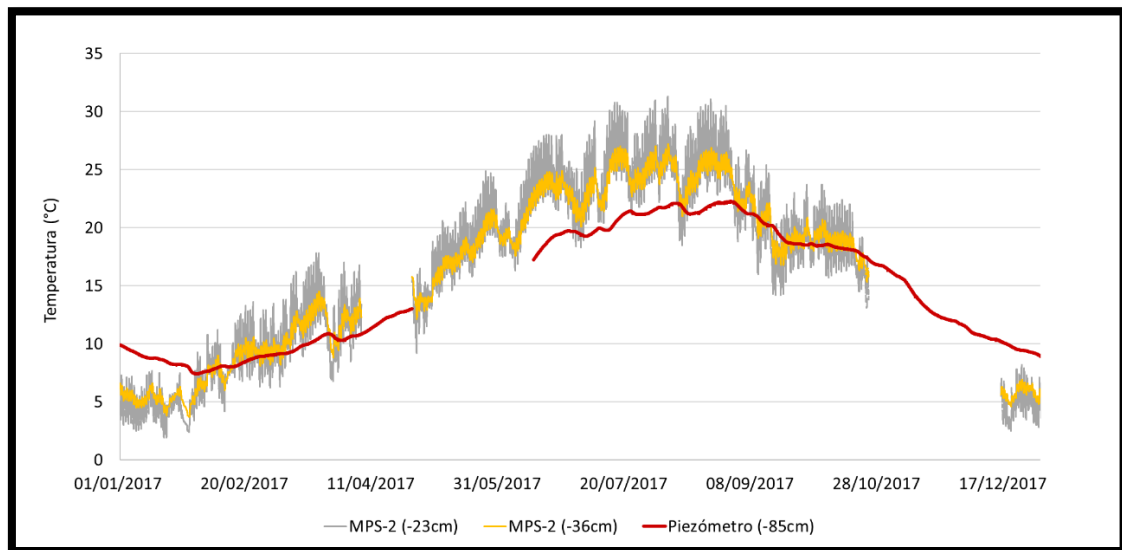


Figura 65. Comportamiento de la temperatura del suelo del año 2017

En la Figura 65 se puede interpretar como los datos de la temperatura para las tres profundidades (-23, -36 y -85cm) fueron muy similares a los dos años anteriores. Los registros no sufren grandes cambios a lo largo del año, variando cada vez menos al aumentar la profundidad. La temperatura más alta fue de 31.3°C en el mes de agosto y la más baja de 1.9°C en el mes de enero.

5.5.6. Temperatura del aire

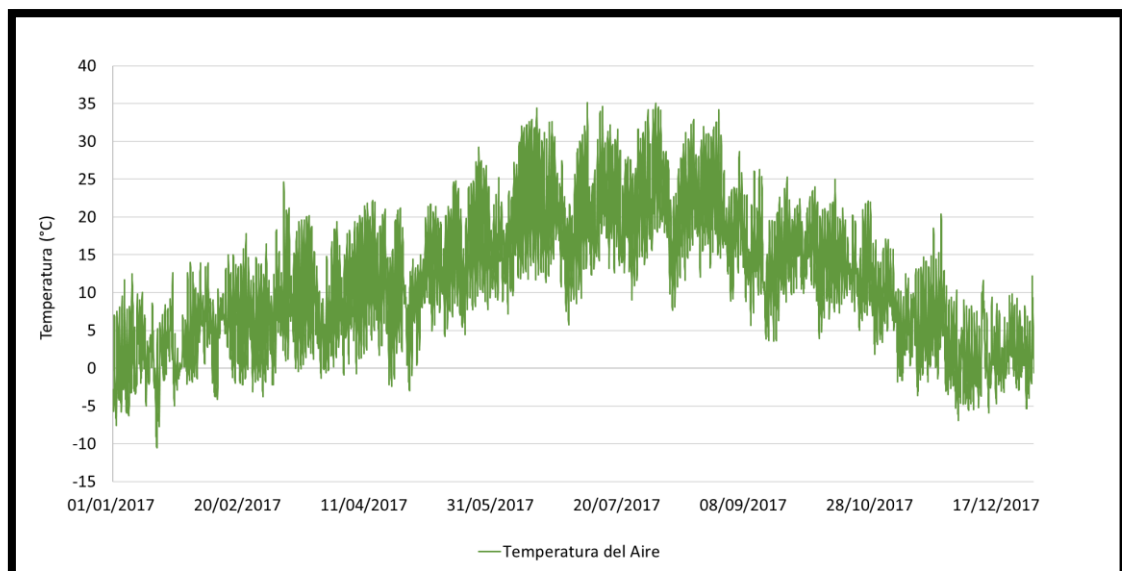


Figura 66. Comportamiento de la temperatura del aire del año 2017

Los registros de la temperatura del aire se muestran en la figura anterior. Se observa como el comportamiento de la temperatura es prácticamente el mismo que en años anteriores, registrando temperaturas que alcanzan los 35°C en la época de verano.

Sin embargo, en la época de invierno, específicamente en el mes de enero se aprecia que se alcanza una temperatura de -10°C , siendo la más baja de los tres años.

5.6. Análisis puntual 2017

5.6.1. Episodio de máxima precipitación diaria

El episodio en donde se registró la mayor cantidad de lluvia en un día fue el 27 de enero, con un total de 61.4mm/día. Este episodio superó los 59.4mm/día del 2016 pero quedó por debajo de los 71.86mm/día registrados en el 2015. Como se muestra en la este fue un episodio de larga duración, en donde llovió el día completo.

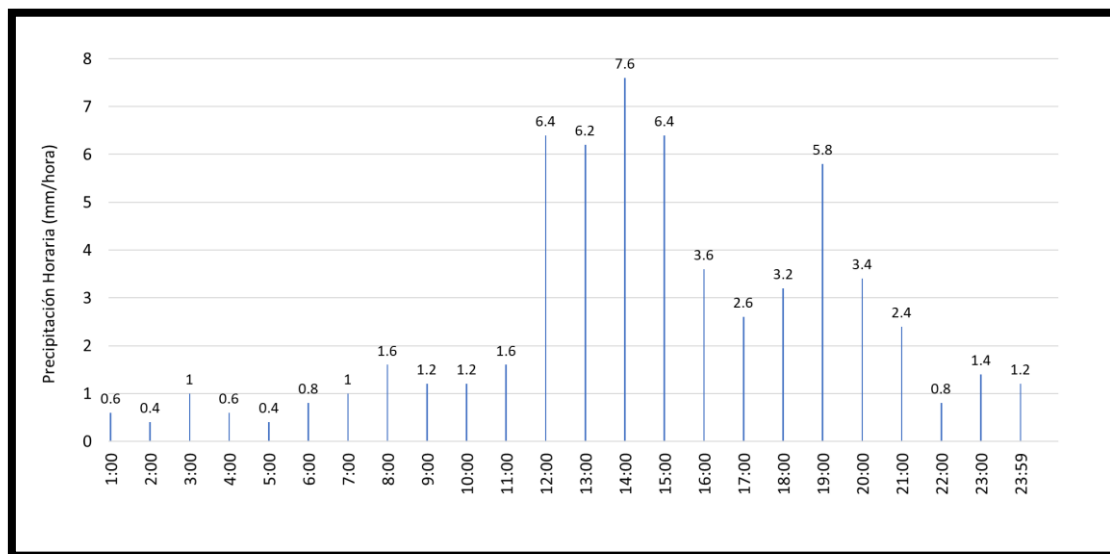


Figura 67. Máxima precipitación diaria del año 2017

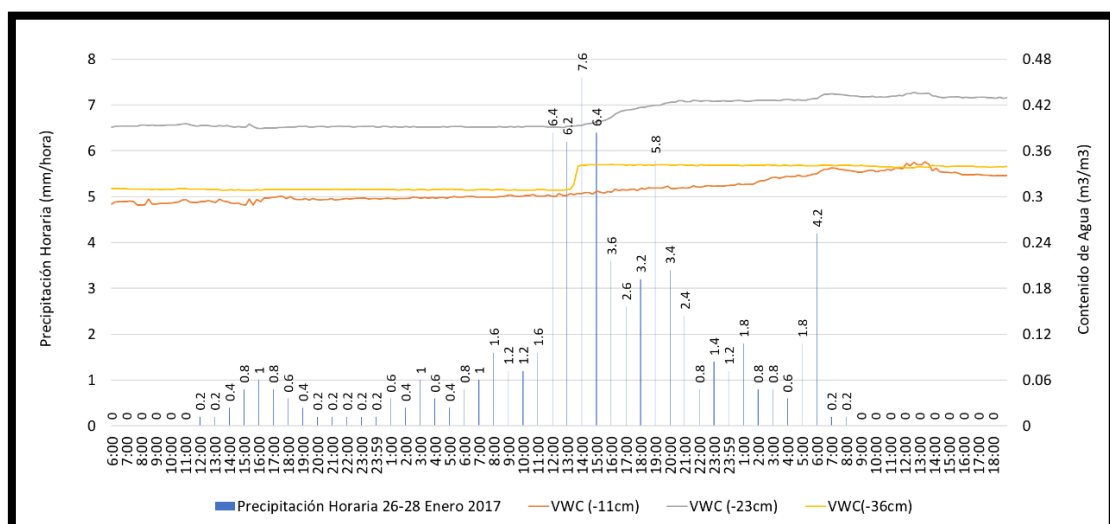


Figura 68. Comportamiento del contenido de agua ante las precipitaciones del 27 de enero del 2017

En la Figura 68 se aprecia la rápida respuesta del sensor de mayor profundidad cuando aumenta la intensidad del episodio, luego de muchas horas de lluvia. Igualmente, los sensores de (-23cm y -11cm) también responden a este tipo de episodio, pero su incremento no fue en poco tiempo como el de (-36cm). Al final del episodio el sensor más superficial alcanza valores de contenido de agua similares a los del de mayor profundidad.

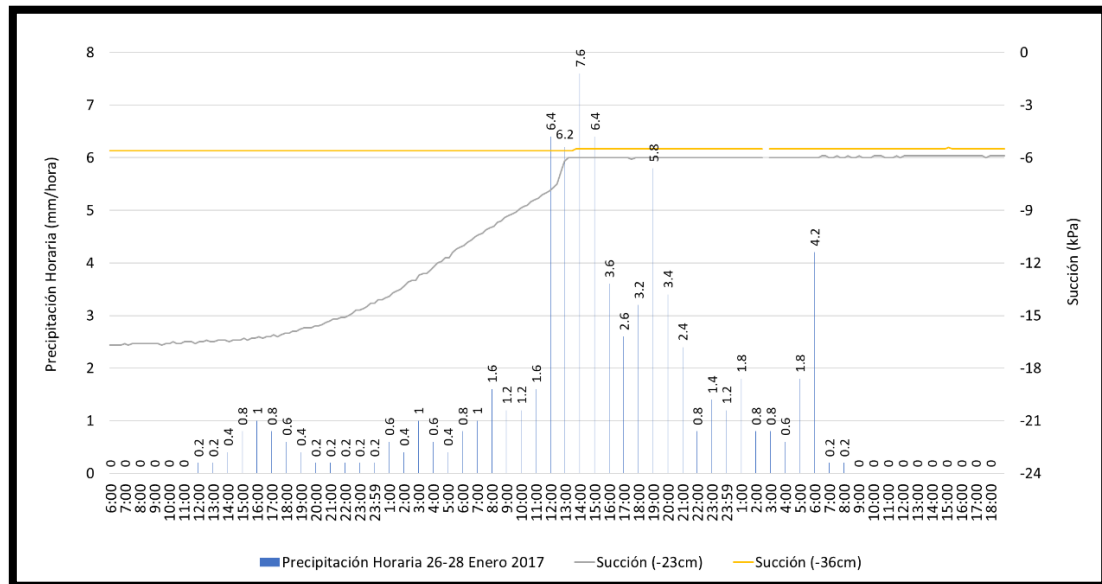


Figura 69. Comportamiento de la succión ante las precipitaciones del 27 de enero del 2017

En este episodio no se observaron cambios significativos en los sensores de succión, como se muestra en la Figura 69. La respuesta del sensor más cercano a la superficie ante las precipitaciones es rápida, aumentando positivamente cuando inicia el episodio. La respuesta de este sensor es aún más rápida cuando aumenta la intensidad horaria del episodio a partir de las 12:00h del día 27 de enero.

Los valores de succión caen hasta los -6 kPa y a partir de aquí se mantienen constantes. El sensor de succión que se encuentra a 36 cm de profundidad no se ve afectado por las lluvias debido a que se encontraba con los valores más bajos de succión que pueden registrar los sensores utilizados.

En la Figura 70 se aprecia como la presión del agua va aumentando poco a poco al inicio del episodio. A partir de la precipitación horaria de 6.4mm de las 12:00h la presión del agua empieza a aumentar positivamente desde -0.81 kPa hasta alcanzar el valor de 0.58 kPa a las 21:00h. A partir de esta gráfica se aprecia la rápida respuesta del piezómetro ante episodios de alta intensidad horaria y larga duración.

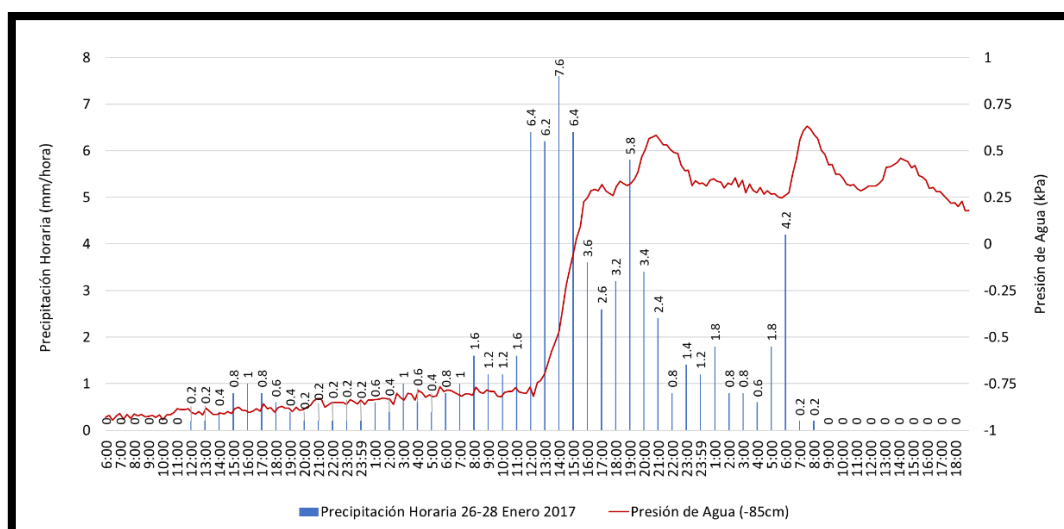


Figura 70. Comportamiento de la presión de agua ante las precipitaciones del 27 de enero del 2017

5.6.2. Episodio de máxima precipitación horaria

El 25 de marzo del 2017 se presentó la mayor precipitación horaria del año, la cual fue de 14.8mm/hora. Este registro horario de lluvia se encuentra muy por debajo de los presentados en 2015 y 2016, en donde se registraron 44.2mm/hora y 26.3mm/hora respectivamente.

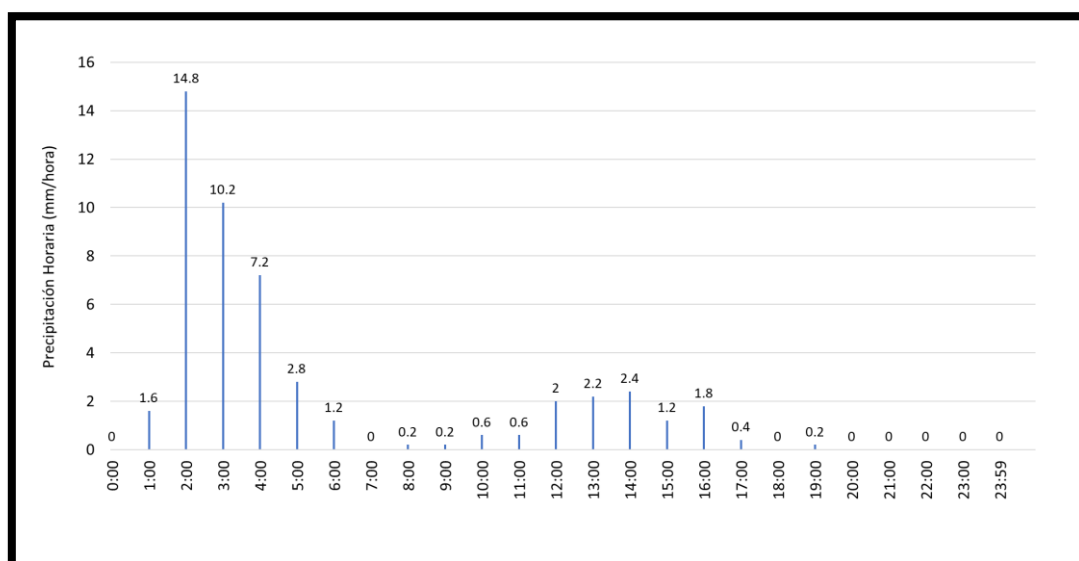


Figura 71. Máxima precipitación horaria del año 2017

En la Figura 72 se muestran las respuestas de los sensores de contenido de agua ante este episodio.

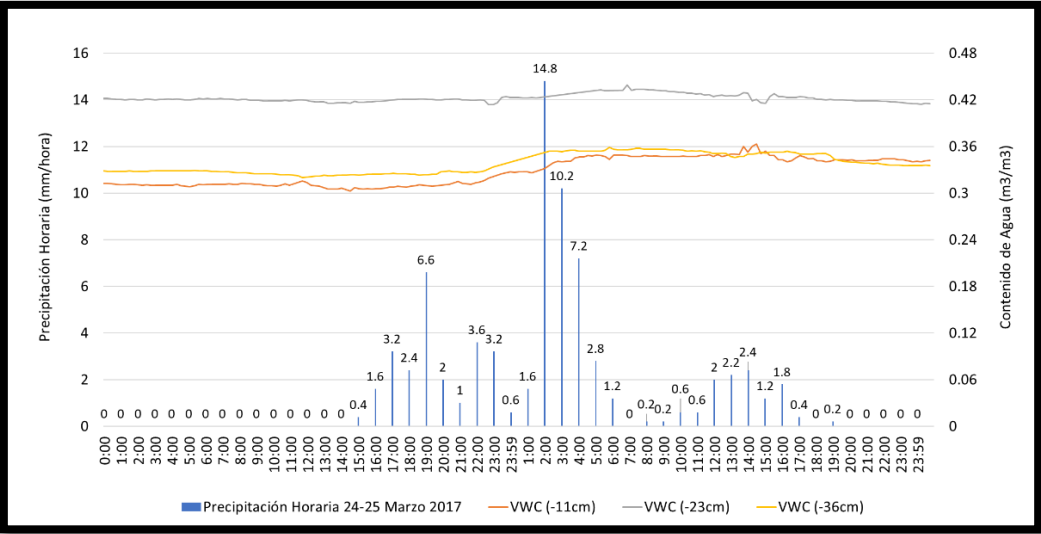


Figura 72. Comportamiento del contenido de agua ante las precipitaciones del 25 de marzo del 2017

Este episodio fue de una alta intensidad y larga duración, en el que se observa un incremento muy similar para los sensores de (-11cm y -36cm). El caso no fue tan similar para el sensor de (-23cm), el cual no registró un cambio significativo en sus medidas. En general se observa la respuesta rápida del terreno ante episodios intensos de larga duración.

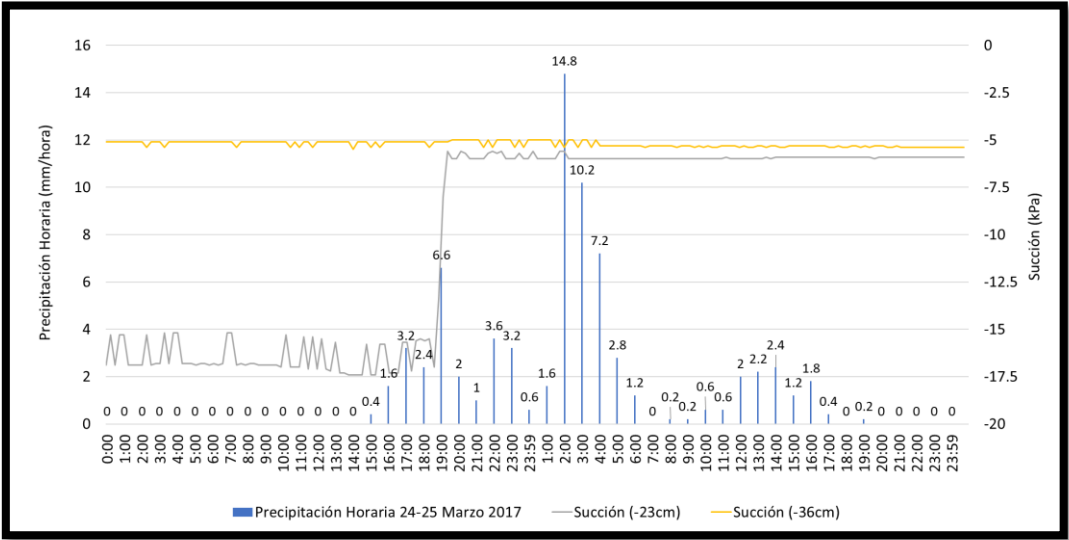


Figura 73. Comportamiento de la succión ante las precipitaciones del 25 de marzo del 2017

Al igual que en el episodio de máxima precipitación diaria del 27 de enero, para este tampoco se registraron cambios muy significativos en la succión de la capa más superficial, como se puede observar en la Figura 73.

Igualmente, el sensor de mayor profundidad se encontraba registrando el valor mínimo de succión que puede registrar el sensor y por consiguiente no presentó cambios en sus lecturas. En estos períodos de primavera el terreno se mantiene muy húmedo por lo que no presentan valores significativos de succión como en la época de verano.

En la Figura 74 se muestran las respuestas del piezómetro ante este episodio.

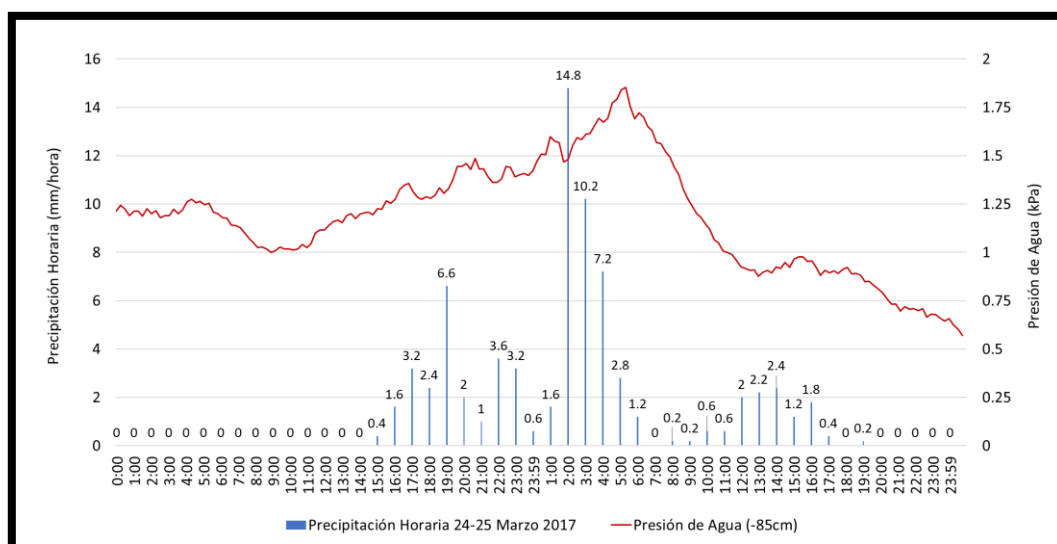


Figura 74. Comportamiento de la presión de agua ante las precipitaciones del 25 de marzo del 2017

Como se observa en la figura anterior, todas las lecturas del piezómetro fueron positivas. Asimismo, se aprecia la respuesta rápida del terreno a esta profundidad (-85cm) para episodios intensos de larga duración. Luego que cae la máxima precipitación horaria se nota un mayor incremento en las lecturas. No obstante, es evidente que antes del episodio las lecturas del piezómetro estaban incrementando, posiblemente por el flujo de aguas subterráneas que se comentó más arriba. De igual manera, es evidente también como la presión de agua disminuye rápidamente al disminuir la intensidad de las lluvias.

5.7. Relación de las precipitaciones con los registros

5.7.1. Episodios más intensos del 2015

A continuación, se muestran las respuestas de cada instrumentación ante los episodios de lluvia más intensos de todo el año 2015. Los episodios seleccionados se muestran en la Figura 75, los cuales se evaluaron junto con las precipitaciones correspondientes para determinar a qué tipo de episodio presentan una mayor respuesta. En la sección de anexos se muestra con detalle cada episodio seleccionado de los tres años.

Fecha	P. Total mm/día	Duración horas	P. Horaria Máx mm/hora	P. Día Anterior mm/día	Parámetro	Medida Inicial	Medida Final	Δ
11-12 Junio 2015	13.10	6	6	10	(-85cm) Presión de Agua (kPa)	N/A	N/A	N/A
					(-23cm) VWC (m3/m3)	0.37	0.39	0.02
					(-23cm) Succión (kPa)	-5.50	-5.50	0.00
					(-36cm) VWC (m3/m3)	0.37	0.38	0.01
					(-36cm) Succión (kPa)	-45.00	-11.20	33.80
13 de Junio 2015	37.60	4	18.20	0.20	(-85cm) Presión de Agua (kPa)	N/A	N/A	N/A
					(-23cm) VWC (m3/m3)	0.37	0.49	0.12
					(-23cm) Succión (kPa)	-5.60	-5.50	0.10
					(-36cm) VWC (m3/m3)	0.37	0.39	0.02
					(-36cm) Succión (kPa)	-11.50	-5.70	5.80
20 de Julio 2015	27.60	7	12.60	0	(-85cm) Presión de Agua (kPa)	-2.57	-2.44	0.14
					(-23cm) VWC (m3/m3)	0.34	0.41	0.07
					(-23cm) Succión (kPa)	-499.70	-18.80	480.90
					(-36cm) VWC (m3/m3)	0.32	0.32	0.00
					(-36cm) Succión (kPa)	-576.90	-552.10	24.80
21 de Julio 2015	39.40	4	29.60	27.60	(-85cm) Presión de Agua (kPa)	-2.73	-2.37	0.36
					(-23cm) VWC (m3/m3)	0.39	0.46	0.07
					(-23cm) Succión (kPa)	-18.80	-5.60	13.20
					(-36cm) VWC (m3/m3)	0.32	0.34	0.02
					(-36cm) Succión (kPa)	-578.20	-510.60	67.60
22 de Julio 2015	49	4	44.20	39.60	(-85cm) Presión de Agua (kPa)	-2.54	-2.06	0.48
					(-23cm) VWC (m3/m3)	0.43	0.45	0.02
					(-23cm) Succión (kPa)	-5.80	-5.60	0.20
					(-36cm) VWC (m3/m3)	0.33	0.36	0.03
					(-36cm) Succión (kPa)	-510.60	-374.80	135.80
30 de Julio 2015	33	5	24	0	(-85cm) Presión de Agua (kPa)	-2.53	-2.21	0.32
					(-23cm) VWC (m3/m3)	0.38	0.44	0.06
					(-23cm) Succión (kPa)	-61.90	-5.70	56.20
					(-36cm) VWC (m3/m3)	0.33	0.37	0.04
					(-36cm) Succión (kPa)	-79.80	-74.80	5.00
17-18 Agosto 2015	53.2	13	15.20	0.20	(-85cm) Presión de Agua (kPa)	-2.66	-2.43	0.23
					(-23cm) VWC (m3/m3)	0.38	0.45	0.07
					(-23cm) Succión (kPa)	-305.30	-5.50	299.80
					(-36cm) VWC (m3/m3)	0.33	0.37	0.05
					(-36cm) Succión (kPa)	-99.30	-48.60	50.70
2-3 Septiembre 2015	32.20	12	8.80	0.80	(-85cm) Presión de Agua (kPa)	-2.50	-2.34	0.16
					(-23cm) VWC (m3/m3)	0.37	0.43	0.06
					(-23cm) Succión (kPa)	-407.30	-6.90	400.40
					(-36cm) VWC (m3/m3)	0.33	0.33	0.00
					(-36cm) Succión (kPa)	-159.00	-99.10	59.90
27 de Octubre 2015	10.60	6	5.20	14.80	(-85cm) Presión de Agua (kPa)	-2.41	-2.33	0.08
					(-23cm) VWC (m3/m3)	0.32	0.34	0.02
					(-23cm) Succión (kPa)	-31.00	-5.60	25.40
					(-36cm) VWC (m3/m3)	0.32	0.32	0.00
					(-36cm) Succión (kPa)	-138.60	-99.70	38.90
2-3 Noviembre 2015	73.10	12	21.20	0	(-85cm) Presión de Agua (kPa)	-2.42	-1.11	1.31
					(-23cm) VWC (m3/m3)	0.33	0.39	0.06
					(-23cm) Succión (kPa)	-17.90	-5.60	12.30
					(-36cm) VWC (m3/m3)	0.32	0.40	0.08
					(-36cm) Succión (kPa)	-101.60	-5.50	96.10

Figura 75. Características de los episodios más intensos del 2015

La primera columna contiene la fecha del episodio, luego se presentan su precipitación total, su duración, precipitación máxima horaria, la precipitación del día anterior y las lecturas de los sensores tanto previas al episodio como posteriores para observar el cambio en las medidas. Para ciertos episodios no se tienen lecturas del piezómetro por falta de datos.

En la Figura 76 se muestra el efecto de los episodios de máximas precipitaciones diarias en el sensor de contenido de agua más superficial (-23cm).

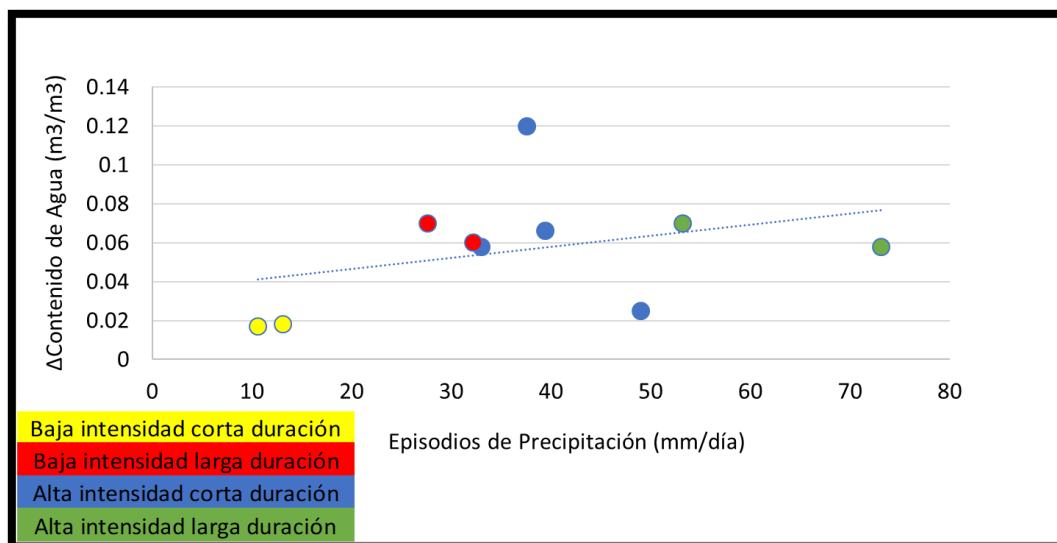


Figura 76. Relación de las máximas precipitaciones diarias y el contenido de agua del sensor (-23cm) del 2015

Cada punto en la gráfica se ubica por la intensidad del episodio de lluvia y el incremento registrado por el episodio. Se observa como los mayores cambios en el contenido de agua se producen con precipitaciones diarias de (25 - 40mm/día). No obstante, las medidas ante estos episodios tienden a aumentar a medida que aumenta la intensidad.

Asimismo, se puede apreciar que episodios de lluvia de baja intensidad y corta duración (baja intensidad con pocas horas de lluvia) no producen cambios apreciables en este sensor. Los demás escenarios sí producen cambios en los registros posiblemente por el hecho de que se encuentra relativamente cerca de la superficie y retenga más agua.

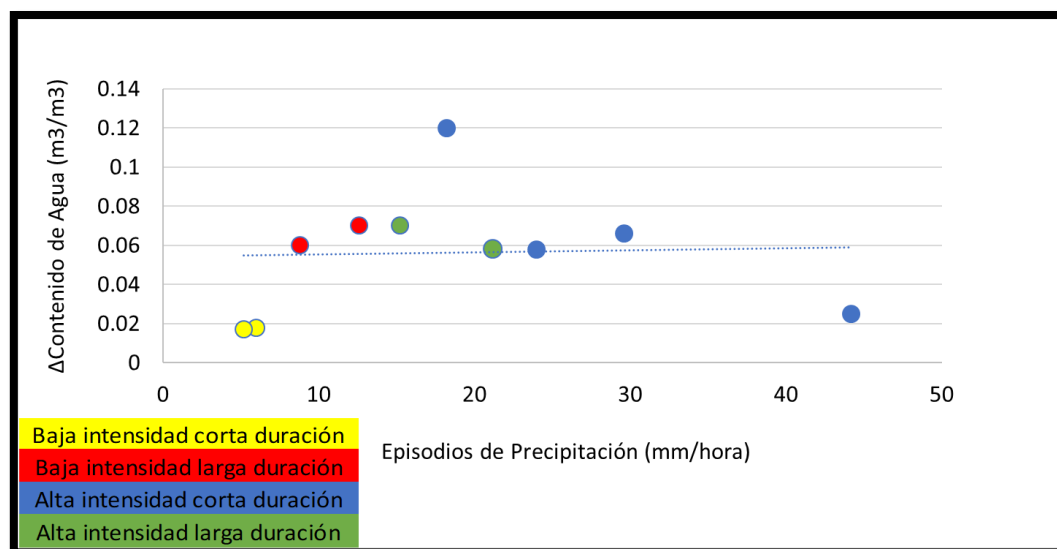


Figura 77. Relación de las máximas precipitaciones horarias y el contenido de agua del sensor (-23cm) del 2015

En este caso se observa que el sensor más cercano a la superficie tiende a presentar mayores cambios mientras aumenta la intensidad de las precipitaciones como se muestra en la Figura 77. Precipitaciones de 12 - 20mm/hora son las que produjeron los cambios más apreciables.

En la Figura 78 se muestran los cambios producidos en los registros de contenido de agua del sensor de mayor profundidad. Se aprecia como este sensor no presenta respuestas apreciables a episodios de baja intensidad. Por el contrario, sí ofrece respuestas a medida que va aumentando la intensidad de las lluvias. Los mayores cambios los producen episodios intensos de larga duración.

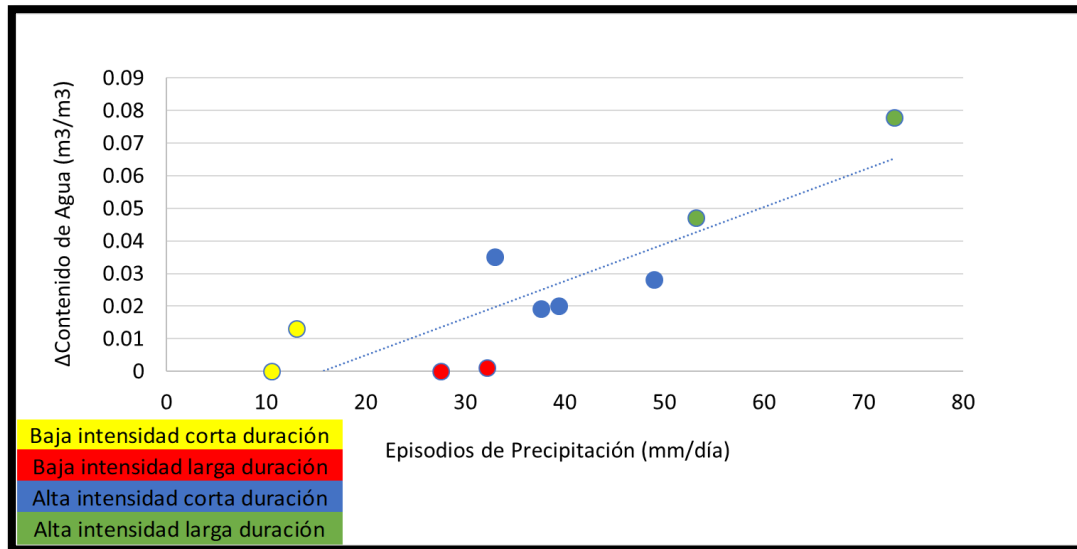


Figura 78. Relación de las máximas precipitaciones diarias y el contenido de agua del sensor (-36cm) del 2015

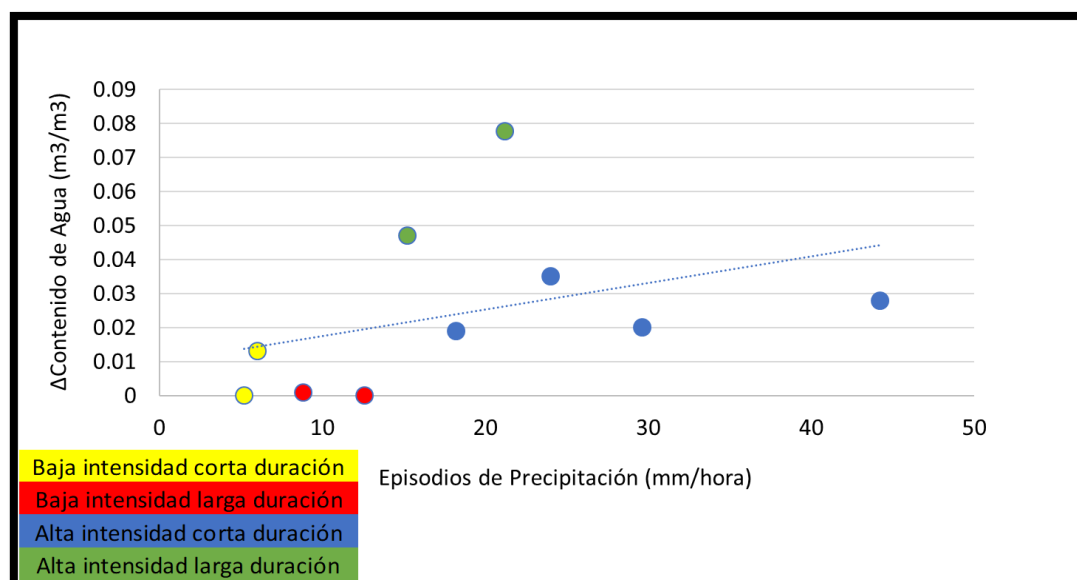


Figura 79. Relación de las máximas precipitaciones horarias y el contenido de agua del sensor (-36cm) del 2015

En el análisis mostrado en la Figura 79, se observa con claridad que los mayores cambios se producen para intensidades horarias entre 15 - 25mm/hora. Si se compara con la Figura 78 se observa que el sensor de mayor profundidad tiende a responder con mayores cambios ante episodios de alta intensidad y larga duración (episodios con muchas horas de lluvias intensas).

Las respuestas del sensor de succión de 23cm de profundidad se muestran en la Figura 80 y Figura 81.

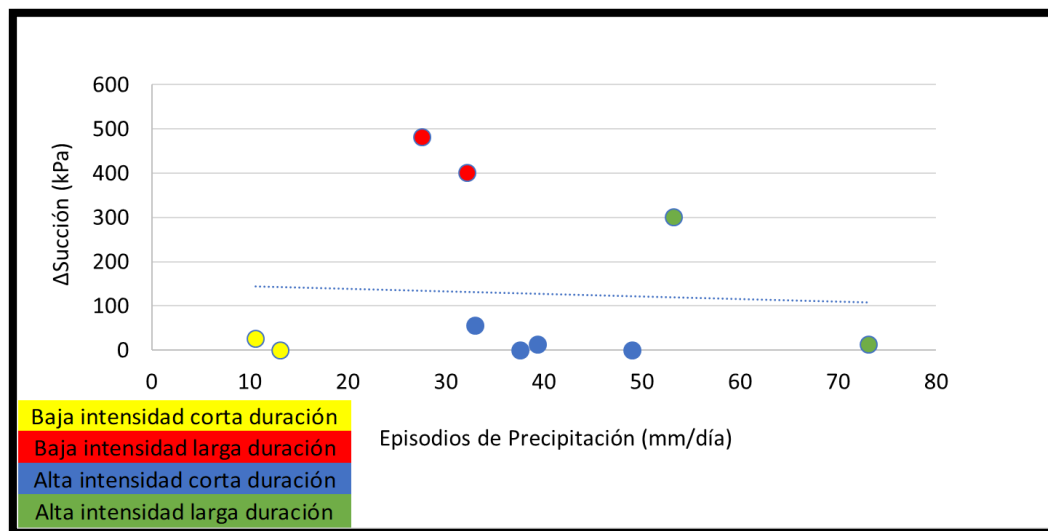


Figura 80. Relación de las máximas precipitaciones diarias y la succión del sensor (-23cm) del 2015

Observando la Figura 80 se puede notar como las respuestas por parte del sensor de succión (-23cm) disminuyen a medida que aumenta la intensidad de las lluvias. No obstante, se aprecia como para episodios de varias horas de lluvia (episodios de larga duración) se obtienen mayores cambios en la succión (300 - 500 kPa). Cabe destacar que estos tres episodios que lograron grandes cambios registraron succiones iniciales muy altas y los que se encuentra por debajo de la línea de tendencia presentaron succiones muy bajas. Los cambios son más significativos cuando las medidas de succión inicial son altas. Los cambios más apreciables se originan con intensidades entre 27 - 53mm/día.

La tendencia mostrada por el sensor (-23cm) ante precipitaciones máximas horarias es prácticamente la misma que para las precipitaciones máximas diarias. Se observa en la Figura 81 una disminución en los registros de succión a medida que se generan altas intensidades horarias. Para precipitaciones de 8 - 18mm/hora se aprecian mayores cambios en los registros.

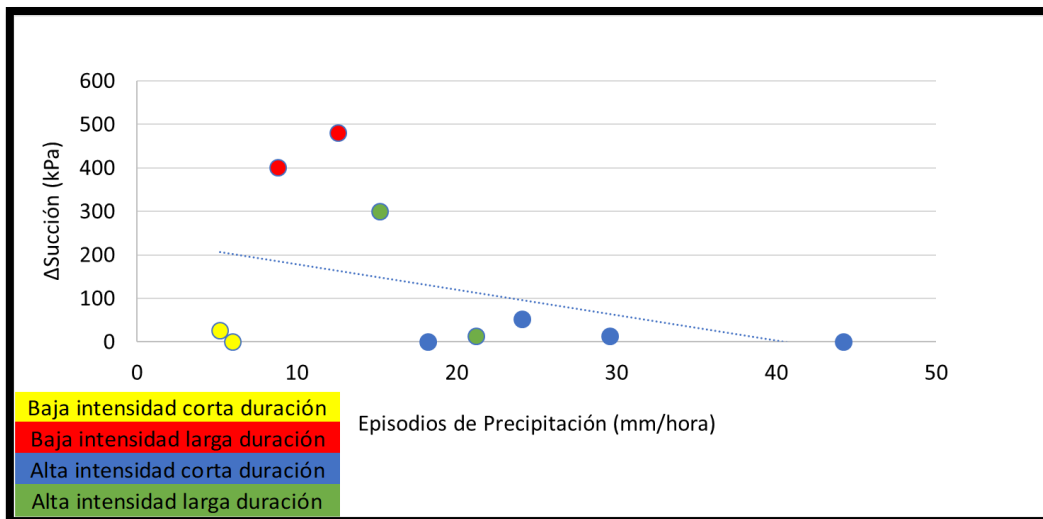


Figura 81. Relación de las máximas precipitaciones horarias y la succión del sensor (-23cm) del 2015

Por otro lado, la tendencia mostrada por los registros del sensor de succión de mayor profundidad es contraria al del sensor de menor profundidad. Se aprecia en la Figura 82 como a medida que aumenta la intensidad de los episodios las respuestas del sensor tienden a ser mayores (pérdida de succión) para precipitaciones diarias. Precipitaciones de 30 - 50mm/día producen los mayores cambios.

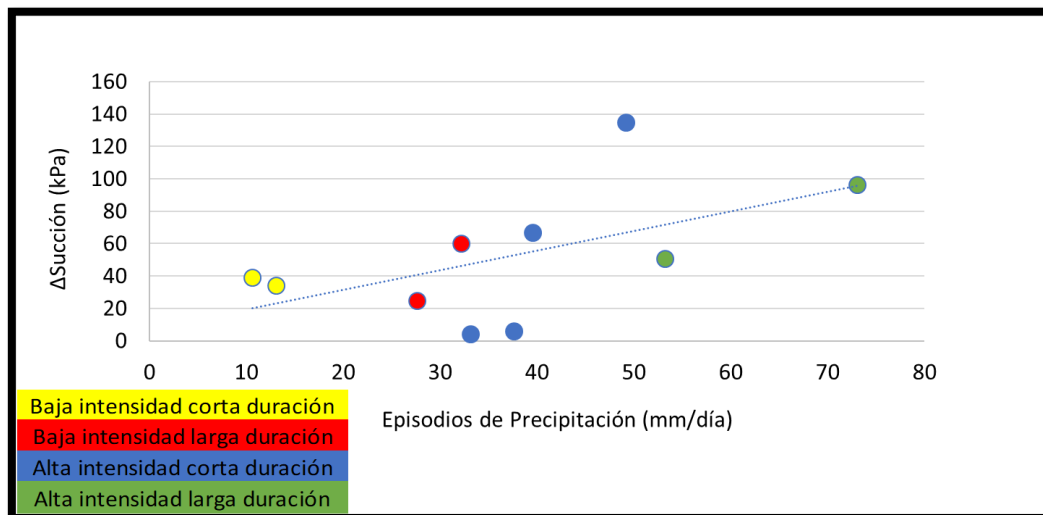


Figura 82. Relación de las máximas precipitaciones diarias y la succión del sensor (-36cm) del 2015

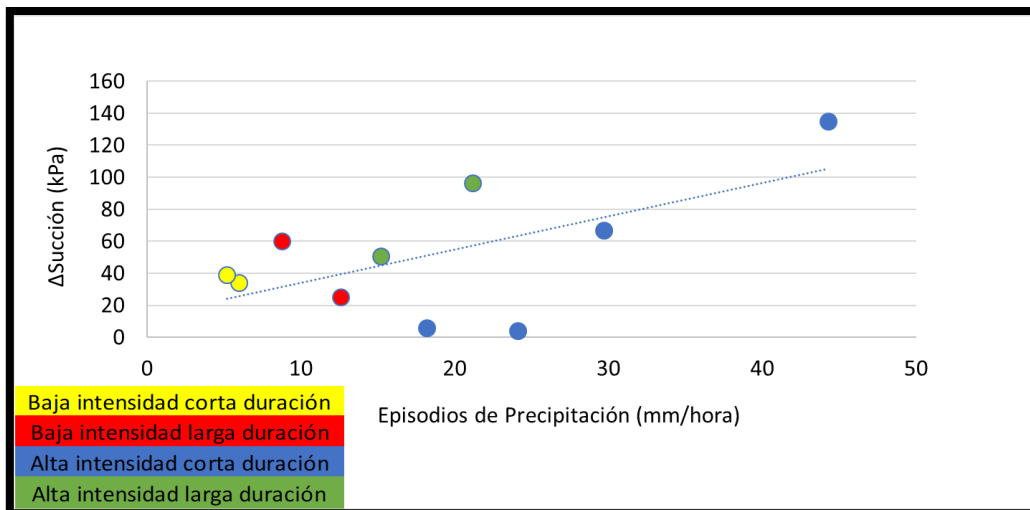


Figura 83. Relación de las máximas precipitaciones horarias y la succión del sensor (-36cm) del 2015

La misma tendencia mostrada ante episodios de máximas precipitaciones diarias de la Figura 82, se repite para el caso de máximas precipitaciones horarias mostrado en la figura anterior, en el cual mientras más aumenta la intensidad horaria, mayores son los incrementos en los registros. Los mayores cambios registrados se presentan para intensidades de 15 – 30mm/hora.

Con los datos arrojados por el piezómetro se realizó el mismo análisis que con el contenido de agua y la succión, con la diferencia que para este caso sólo se pudo trabajar con 8 episodios por falta de datos.

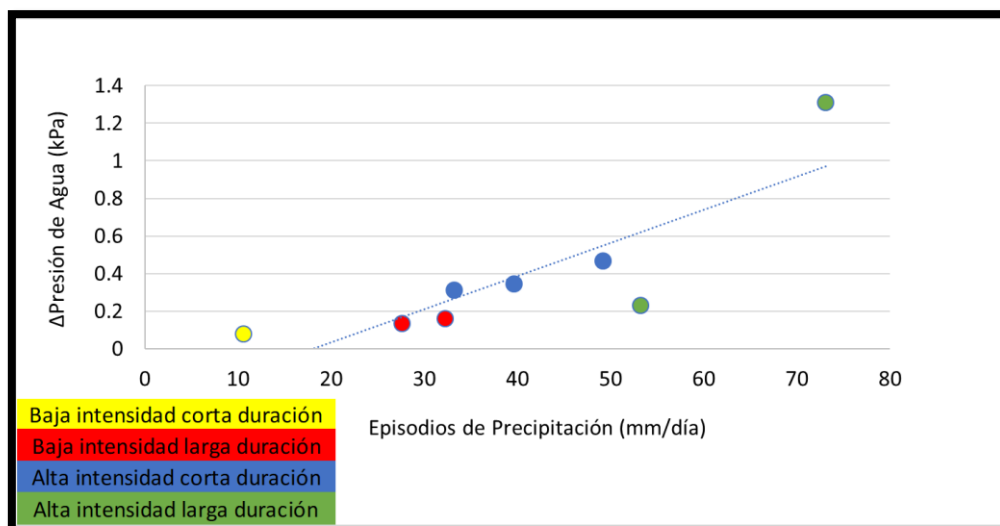


Figura 84. Relación de las máximas precipitaciones diarias y la presión de agua del piezómetro (-85cm) del 2015

De la Figura 84 se puede interpretar que los cambios generados en las medidas del piezómetro van aumentando según van creciendo las intensidades diarias de los episodios.

Las bajas intensidades produjeron cambios despreciables en las medidas arrojadas por el piezómetro. El mismo comportamiento se puede apreciar en el análisis realizado para las máximas precipitaciones horarias mostrado en la Figura 85.

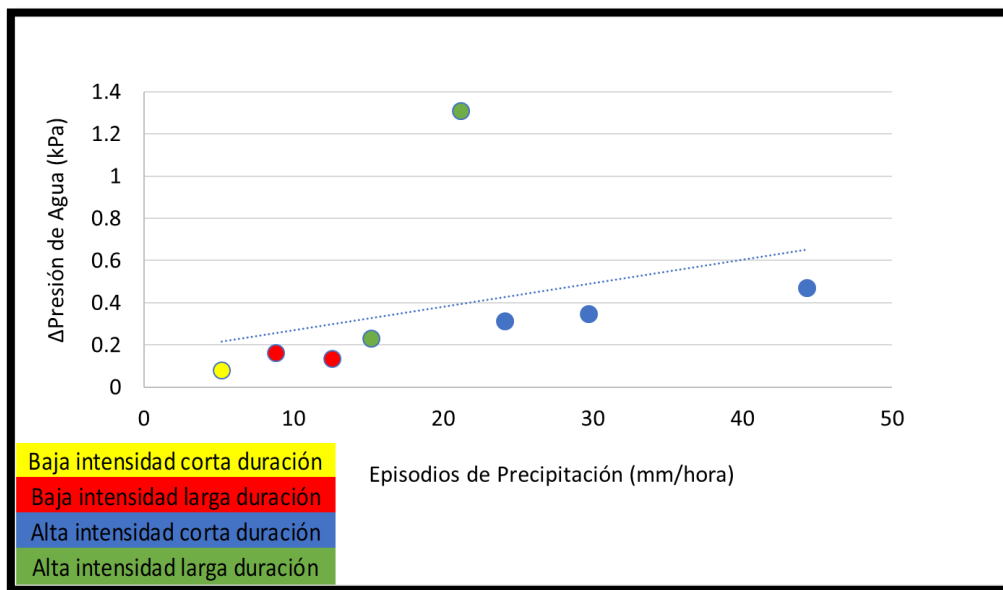


Figura 85. Relación de las máximas precipitaciones horarias y la presión de agua del piezómetro (-85cm) del 2015

Como se mencionó anteriormente, la tendencia en este caso es similar al caso de las precipitaciones diarias, en donde a medida que aumenta la intensidad de las precipitaciones, se producen mayores cambios en los registros del piezómetro. No obstante, para intensidades diarias el piezómetro muestra una tendencia más progresiva. Intensidades de 20 - 30mm/hora originaron los incrementos más apreciables.

5.7.2. Episodios más intensos del 2016

Al igual que para el año 2015, para el 2016 también se muestran las respuestas de los sensores en los episodios de lluvia más intensos. En la Figura 86 se observan los episodios seleccionados para el análisis.

Fecha	P. Total mm/día	Duración horas	P. Horaria Máx mm/hora	P. Día Anterior mm/día	Parámetro	Medida Inicial	Medida Final	Δ
20-21 Abril 2016	42.00	15	8.40	0	(-85cm) Presión de Agua (kPa)	0.11	1.07	0.96
					(-23cm) VWC (m3/m3)	0.33	0.38	0.05
					(-23cm) Succión (kPa)	-47.70	-5.50	42
					(-36cm) VWC (m3/m3)	0.34	0.39	0.05
					(-36cm) Succión (kPa)	-16.60	-5.50	11.10
8-9 Mayo 2016	71.80	36	5.50	0.30	(-85cm) Presión de Agua (kPa)	-1.71	0.29	2.00
					(-23cm) VWC (m3/m3)	0.35	0.39	0.04
					(-23cm) Succión (kPa)	-23.10	-5.70	17.40
					(-36cm) VWC (m3/m3)	0.35	0.39	0.04
					(-36cm) Succión (kPa)	-6.50	-5.50	1.00
28 de mayo 2016	32.20	4	26.30	0.00	(-85cm) Presión de Agua (kPa)	-1.72	-1.52	0.20
					(-23cm) VWC (m3/m3)	0.33	0.34	0.02
					(-23cm) Succión (kPa)	-145.10	-5.60	139.50
					(-36cm) VWC (m3/m3)	0.334	0.335	0.001
					(-36cm) Succión (kPa)	-48.30	-43.60	4.70
17-18 de Junio 2016	9.80	11	2.10	0.10	(-85cm) Presión de Agua (kPa)	-2.59	-2.47	0.12
					(-23cm) VWC (m3/m3)	0.32	0.35	0.02
					(-23cm) Succión (kPa)	-417.80	-5.50	412.30
					(-36cm) VWC (m3/m3)	0.32	0.32	0
					(-36cm) Succión (kPa)	-168.60	-39.70	128.90
30 de Junio 2016	18.60	2	16.40	7.60	(-85cm) Presión de Agua (kPa)	-2.79	-2.53	0.26
					(-23cm) VWC (m3/m3)	0.31	0.33	0.02
					(-23cm) Succión (kPa)	-495.10	-6.00	489.10
					(-36cm) VWC (m3/m3)	0.32	0.32	0.00
					(-36cm) Succión (kPa)	-520.30	-5.70	514.60
10 de Septiembre 2016	20.80	1	20.80	38.40	(-85cm) Presión de Agua (kPa)	N/A	N/A	N/A
					(-23cm) VWC (m3/m3)	0.30	0.35	0.04
					(-23cm) Succión (kPa)	-22.20	-7.40	14.80
					(-36cm) VWC (m3/m3)	0.31	0.32	0.02
					(-36cm) Succión (kPa)	-711.20	-677.20	34.00
12-14 Octubre 2016	71.80	31	10.40	0.00	(-85cm) Presión de Agua (kPa)	N/A	N/A	N/A
					(-23cm) VWC (m3/m3)	0.30	0.37	0.07
					(-23cm) Succión (kPa)	-380.80	-5.50	375.30
					(-36cm) VWC (m3/m3)	0.30	0.37	0.06
					(-36cm) Succión (kPa)	-910.00	-5.50	904.50
20-21 Noviembre 2016	60.40	24	8.60	0.20	(-85cm) Presión de Agua (kPa)	N/A	N/A	N/A
					(-23cm) VWC (m3/m3)	0.31	0.37	0.06
					(-23cm) Succión (kPa)	-58.40	-5.60	52.80
					(-36cm) VWC (m3/m3)	0.32	0.39	0.065
					(-36cm) Succión (kPa)	-56.70	-5.60	51.10
22 de Noviembre 2016	18.40	6	7.40	59.40	(-85cm) Presión de Agua (kPa)	N/A	N/A	N/A
					(-23cm) VWC (m3/m3)	0.36	0.37	0.01
					(-23cm) Succión (kPa)	-5.60	-5.50	0.10
					(-36cm) VWC (m3/m3)	0.37	0.39	0.02
					(-36cm) Succión (kPa)	-5.60	-5.50	0.10
23-24 Noviembre 2016	49.00	10	13.60	18.40	(-85cm) Presión de Agua (kPa)	N/A	N/A	N/A
					(-23cm) VWC (m3/m3)	0.36	0.40	0.04
					(-23cm) Succión (kPa)	-5.50	-5.50	0
					(-36cm) VWC (m3/m3)	0.36	0.39	0.03
					(-36cm) Succión (kPa)	-5.50	-5.40	0.10

Figura 86. Características de los episodios más intensos del 2016

En la Figura 87 se muestran los incrementos presentados por el sensor de contenido de agua de menor profundidad ante los diez episodios seleccionado. La tendencia presentada por el terreno a esta profundidad es progresiva a medida que aumenta la intensidad de las lluvias. Asimismo, se puede apreciar que las mayores respuestas son provocadas por precipitaciones de alta intensidad y larga duración.

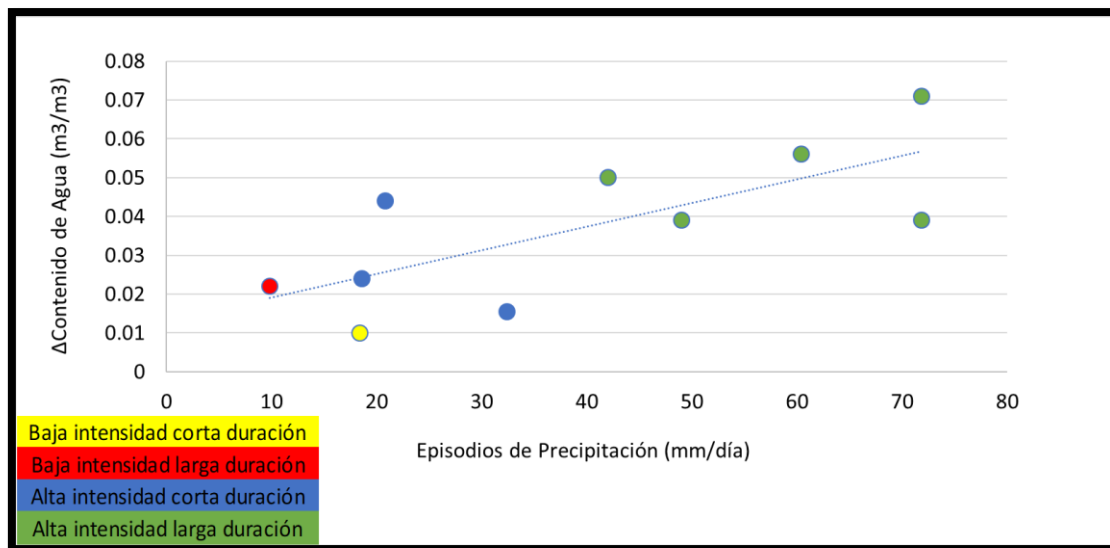


Figura 87. Relación de las máximas precipitaciones diarias y el contenido de agua del sensor (-23cm) del 2016

Las repuestas en el análisis de precipitaciones horarias mostradas en la Figura 88 fueron lo contrario. Se aprecia como a medida que aumenta la intensidad horaria no necesariamente son mayores los cambios. En este caso los mayores cambios se dan para precipitaciones con intensidades horarias entre 5-15mm/hora.

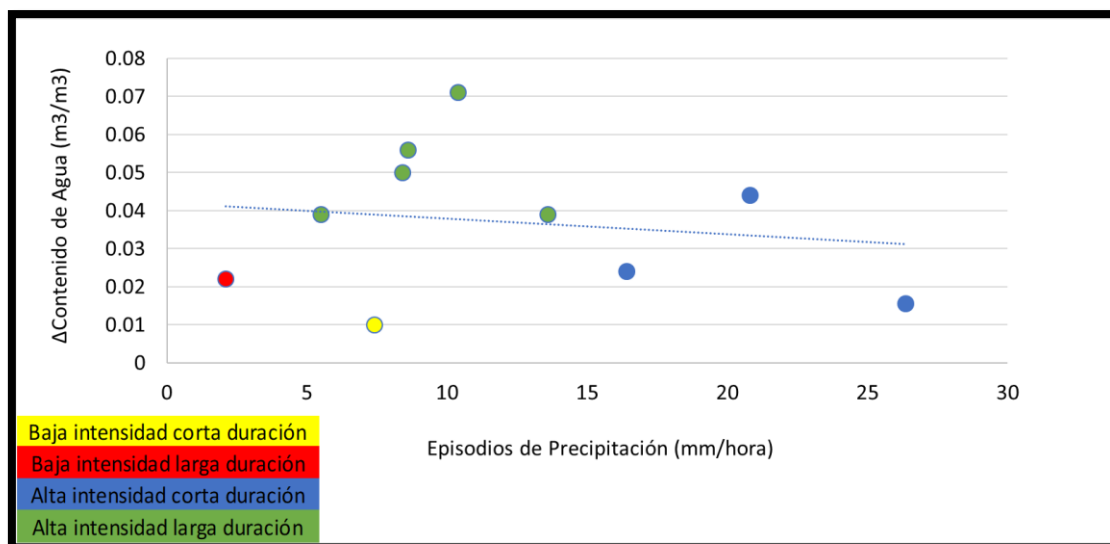


Figura 88. Relación de las máximas precipitaciones horarias y el contenido de agua del sensor (-23cm) del 2016

En el análisis de máximas precipitaciones diarias del sensor de contenido de agua de mayor profundidad (-36cm) se observa el mismo comportamiento que para el sensor de (-23cm).

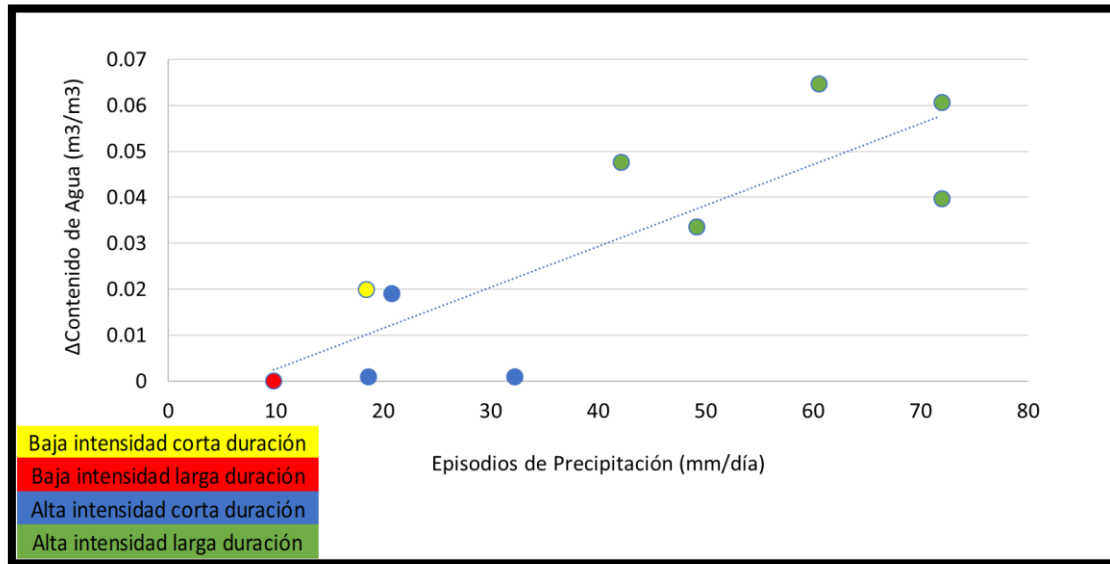


Figura 89. Relación de las máximas precipitaciones diarias y el contenido de agua del sensor (-36cm) del 2016

A medida que aumenta la intensidad de las lluvias se generan mayores cambios en los registros del sensor de (-36cm) mostrados en la figura anterior. Los incrementos más significativos los siguen produciendo episodios intensos de larga duración.

Las respuestas ante las máximas precipitaciones horarias fueron diferentes a las máximas diarias pero muy similares al análisis de lluvias horarias del sensor de menor profundidad (-23cm) de la Figura 88.

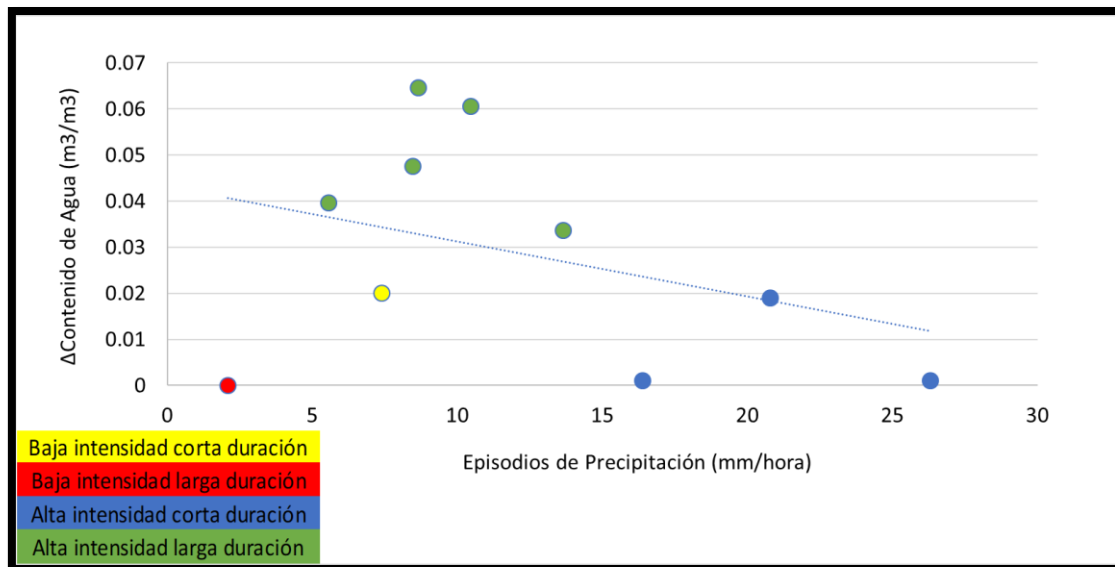


Figura 90. Relación de las máximas precipitaciones horarias y el contenido de agua del sensor (-36cm) del 2016

En la figura anterior se observa que para los episodios estudiado se presentan menos cambios a medida que aumenta la intensidad horaria. Estos episodios de mayor intensidad horaria son de corta duración, demostrándose de esta manera que este sensor a esta profundidad presenta mayores respuestas ante episodios intensos, pero de larga duración.

Las respuestas presentadas por el sensor de succión de menor profundidad fueron muy similares a las del 2015. Se interpreta en la Figura 91 que para la mayoría de los episodios intensos se registraron pocos cambios. Al igual que para el análisis del año anterior, los episodios por encima de la línea de tendencia presentaron lecturas iniciales de succión significativas, generándose un mayor cambio ante diferentes intensidades. Los casos ubicados por debajo de la línea de tendencia presentaron succiones iniciales muy bajas por lo que no se produjeron cambios significativos.

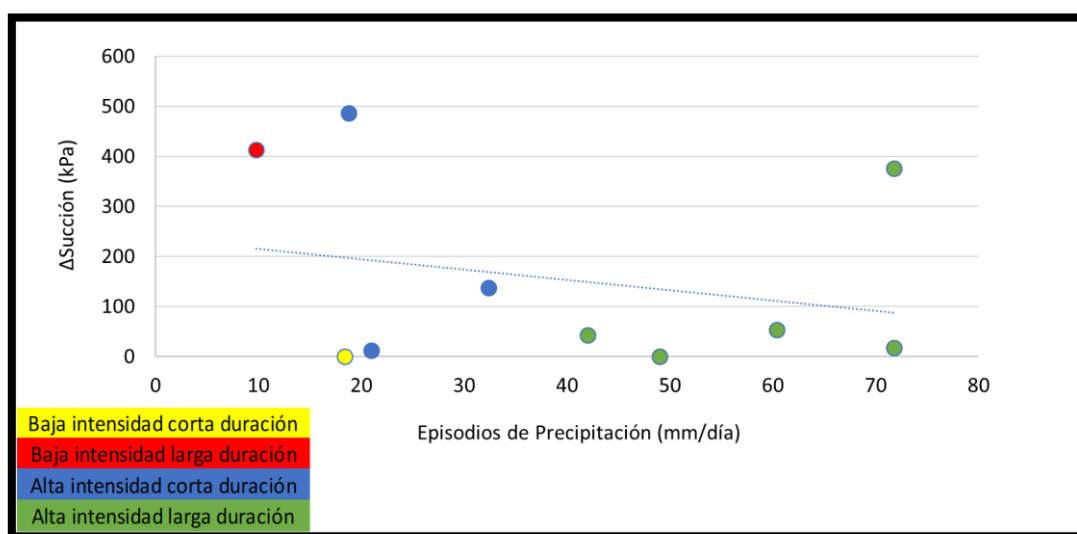


Figura 91. Relación de las máximas precipitaciones diarias y la succión del sensor (-23cm) del 2016

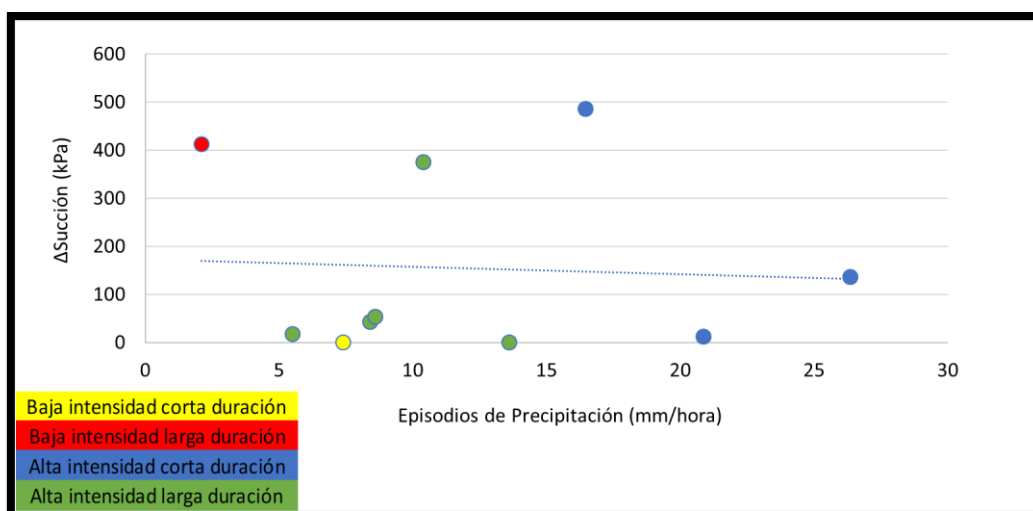


Figura 92. Relación de las máximas precipitaciones horarias y la succión del sensor (-23cm) del 2016

En el análisis de las precipitaciones máximas horarias mostrado en la figura anterior, se aprecia el mismo comportamiento que para el análisis de precipitaciones máximas diarias. Se observa nuevamente en los casos presentados que, si se presentan medidas de succión bajas antes del episodio, no se registrarán cambios significativos ante los episodios.

El análisis del sensor de mayor profundidad para las precipitaciones máximas diarias se muestra en la Figura 93. Este caso es similar al presentado en el 2015, en donde se muestran mayores cambios a medida que aumenta la intensidad para los casos ubicados por encima de la línea de tendencia. A diferencia del año anterior, en este 2016 se registraron cambios aún mayores porque se presentaron succiones iniciales en ciertos casos, más altas que las del 2015.

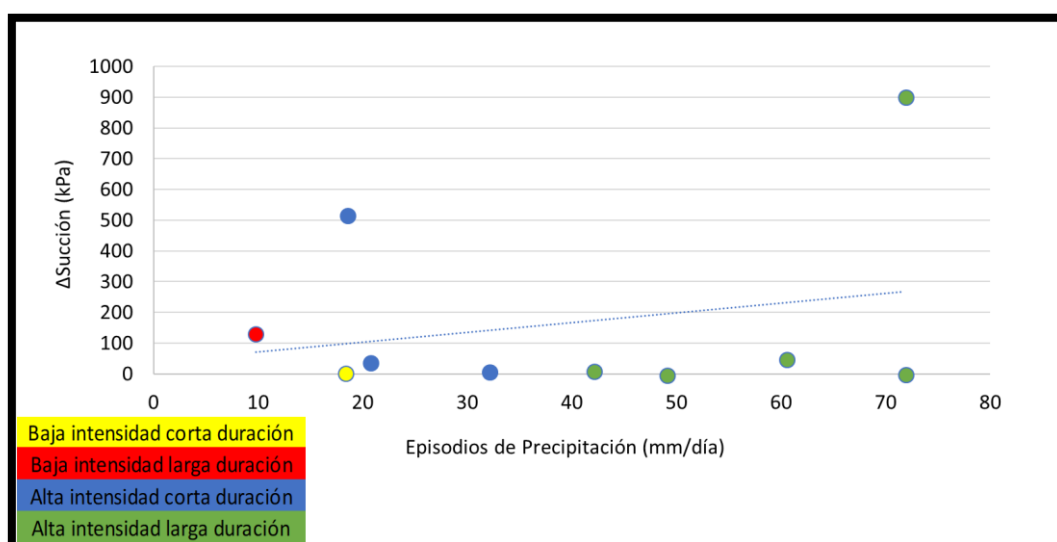


Figura 93. Relación de las máximas precipitaciones diarias y la succión del sensor (-36cm) del 2016

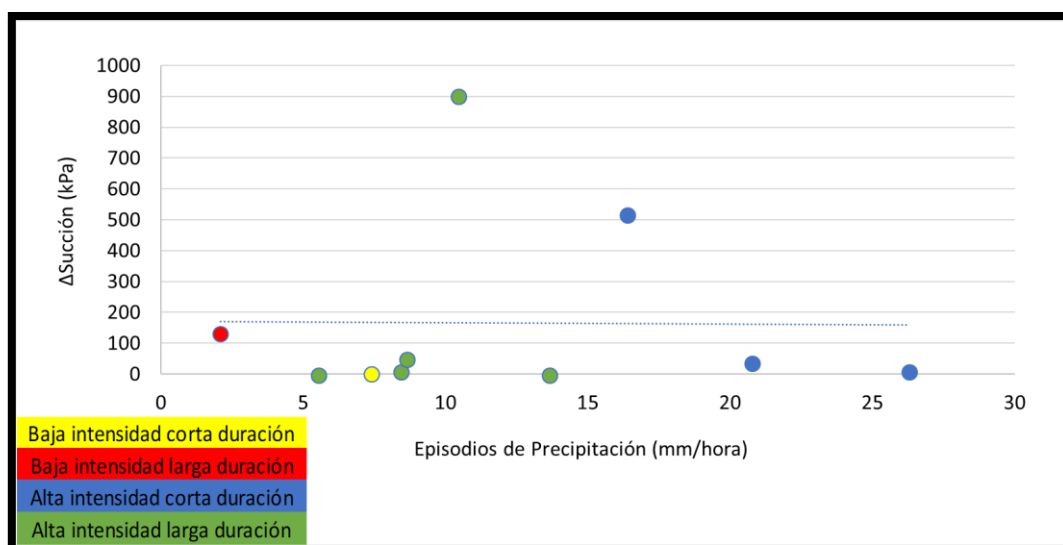


Figura 94. Relación de las máximas precipitaciones horarias y la succión del sensor (-36cm) del 2016

En el caso de los registros ante las precipitaciones máximas horarias, las respuestas fueron diferentes. Como se observa en la figura anterior, los casos con mayores cambios se presentaron con intensidades horarias relativamente bajas. En los dos casos presentados para este sensor, se observa una mayor relación ante episodios intensos de larga duración.

En los análisis correspondientes para el piezómetro, por falta de datos sólo se presentaron 5 casos de los mostrados en la Figura 86. Se agregó un caso más (4-5 de abril) que no fue listado en los episodios seleccionados por falta de datos de los sensores de contenido de agua y lecturas muy despreciables para los sensores de succión.

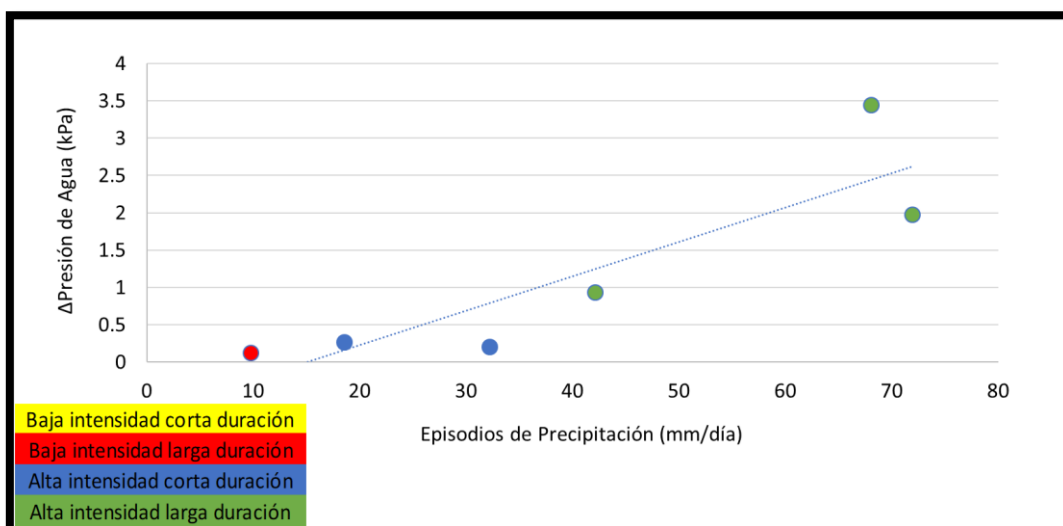


Figura 95. Relación de las máximas precipitaciones diarias y la presión de agua del piezómetro (-85cm) del 2016

En la figura anterior se observa el comportamiento de las lecturas del piezómetro para episodios de alta intensidad diaria. Como se puede apreciar existe una gran respuesta ante este tipo de episodios.

En el caso que se agregó del 4-5 de abril se registró el mayor incremento de los tres años estudiados ($\Delta 3.47$ kPa) producido por un episodio de bastante intensidad.

En el caso del análisis ante precipitaciones máximas horarias mostrado en la Figura 96 la tendencia fue diferente a las de la figura anterior. Se aprecia como los mayores cambios son producidos por episodios con intensidades de 5 – 10mm/hora.

Se observa también que para los episodios de altas intensidades horarias los cambios son muy bajos. En general se puede interpretar que los cambios en las lecturas del piezómetro responden a episodios de altas intensidades y larga duración.

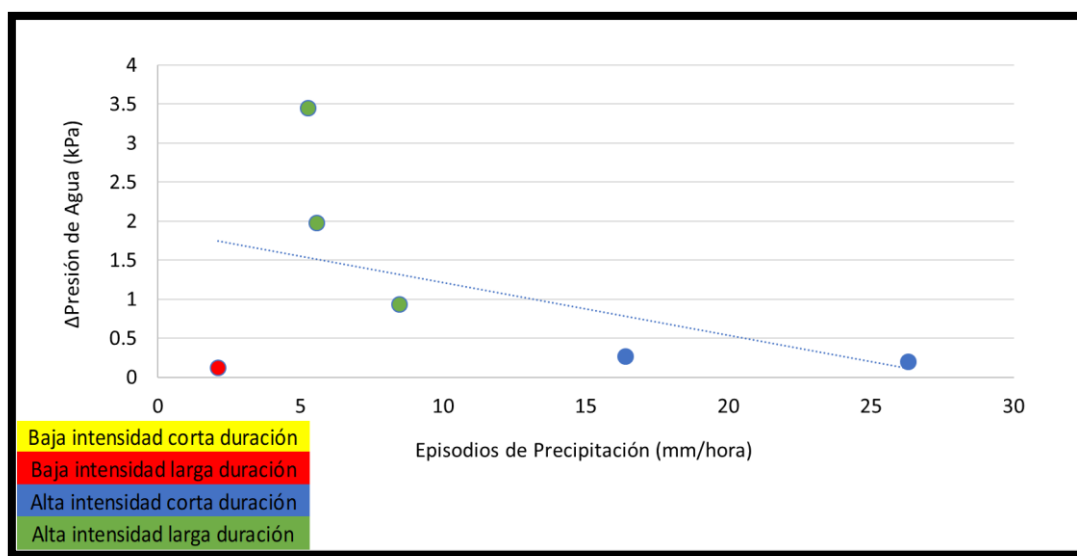


Figura 96. Relación de las máximas precipitaciones horarias y la presión de agua del piezómetro (-85cm) del 2016

5.7.3. Episodios más intensos del 2017

Finalmente, para el año 2017 se seleccionaron nuevamente los diez episodios más intensos que provocaron cambios importantes en las lecturas de los instrumentos. En la Figura 97 se muestran las características de dichos episodios.

Al igual que en años anteriores, los cambios presentados por los casos seleccionados responden en general a lluvias intensas de larga duración. En este último año se realizaron más análisis debido al nuevo sensor de contenido de agua (-11cm). En el caso del piezómetro sólo se presentan ocho episodios como en el 2015 debido a la falta de datos.

Fecha	P. Total mm/día	Duración horas	P. Horaria Máx mm/hora	P. Día Anterior mm/día	Parámetro	Medida Inicial	Medida Final	Δ
26-28 Enero 2017	77.2	45	7.6	3	(-85cm) Presión de Agua (kPa)	-0.94	0.61	1.55
					(-11cm) VWC (m3/m3)	0.29	0.33	0.04
					(-23cm) VWC (m3/m3)	0.39	0.43	0.04
					(-23cm) Succión (kPa)	-16.70	-6.00	10.70
					(-36cm) VWC (m3/m3)	0.31	0.34	0.03
					(-36cm) Succión (kPa)	-5.60	-5.50	0.10
13-14 Febrero 2017	62.8	16	7.4	0.20	(-85cm) Presión de Agua (kPa)	0.13	1.29	1.16
					(-11cm) VWC (m3/m3)	0.32	0.36	0.04
					(-23cm) VWC (m3/m3)	0.42	0.43	0.01
					(-23cm) Succión (kPa)	-5.70	-5.50	0.20
					(-36cm) VWC (m3/m3)	0.31	0.34	0.03
					(-36cm) Succión (kPa)	-5.50	-5.40	0.10
3-4 Marzo 2017	29.8	9	8.4	0	(-85cm) Presión de Agua (kPa)	2.03	3.31	1.28
					(-11cm) VWC (m3/m3)	0.32	0.34	0.02
					(-23cm) VWC (m3/m3)	0.39	0.42	0.03
					(-23cm) Succión (kPa)	-9.10	-6.00	3.10
					(-36cm) VWC (m3/m3)	0.32	0.35	0.03
					(-36cm) Succión (kPa)	-5.40	-5.40	0.00
24-25 Marzo 2017	74.2	27	14.8	1.80	(-85cm) Presión de Agua (kPa)	1.15	1.85	0.70
					(-11cm) VWC (m3/m3)	0.30	0.35	0.05
					(-23cm) VWC (m3/m3)	0.42	0.43	0.02
					(-23cm) Succión (kPa)	-17.40	-6.00	11.40
					(-36cm) VWC (m3/m3)	0.33	0.35	0.03
					(-36cm) Succión (kPa)	-5.30	-5.30	0.00
26-27 Abril 2017	27.8	12	3	4.20	(-85cm) Presión de Agua (kPa)	N/A	N/A	N/A
					(-11cm) VWC (m3/m3)	0.28	0.32	0.04
					(-23cm) VWC (m3/m3)	0.36	0.40	0.04
					(-23cm) Succión (kPa)	-181.40	-5.50	175.90
					(-36cm) VWC (m3/m3)	0.32	0.33	0.01
					(-36cm) Succión (kPa)	-6.20	-5.50	0.70
2 de Junio de 2017	1.9	3	1.5	13.67	(-85cm) Presión de Agua (kPa)	N/A	N/A	N/A
					(-11cm) VWC (m3/m3)	0.29	0.30	0.01
					(-23cm) VWC (m3/m3)	0.40	0.42	0.02
					(-23cm) Succión (kPa)	-506.40	-6.80	499.60
					(-36cm) VWC (m3/m3)	0.28	0.28	0.00
					(-36cm) Succión (kPa)	-400.10	-69.20	330.90
22 de Junio de 2017	7.6	4	3.2	0.13	(-85cm) Presión de Agua (kPa)	-2.03	-1.97	0.06
					(-11cm) VWC (m3/m3)	0.27	0.30	0.03
					(-23cm) VWC (m3/m3)	0.39	0.41	0.02
					(-23cm) Succión (kPa)	-500.00	-5.60	494.40
					(-36cm) VWC (m3/m3)	0.27	0.28	0.01
					(-36cm) Succión (kPa)	-635.30	-5.60	629.70
20 de Julio de 2017	15.2	2	9.5	0	(-85cm) Presión de Agua (kPa)	-2.12	-2.02	0.10
					(-11cm) VWC (m3/m3)	0.27	0.31	0.04
					(-23cm) VWC (m3/m3)	0.37	0.40	0.03
					(-23cm) Succión (kPa)	-521.40	-5.70	515.70
					(-36cm) VWC (m3/m3)	0.27	0.27	0.00
					(-36cm) Succión (kPa)	-557.40	-5.70	551.70
14-15 Septiembre 2017	35.4	17	4.4	0	(-85cm) Presión de Agua (kPa)	-2.05	-1.99	0.06
					(-11cm) VWC (m3/m3)	0.27	0.31	0.04
					(-23cm) VWC (m3/m3)	0.33	0.33	0.00
					(-23cm) Succión (kPa)	-930.70	-5.90	924.80
					(-36cm) VWC (m3/m3)	0.27	0.27	0.00
					(-36cm) Succión (kPa)	-823.10	-127.40	695.70
18-19 Octubre 2017	60.6	26	11.2	0	(-85cm) Presión de Agua (kPa)	-2.02	-1.93	0.09
					(-11cm) VWC (m3/m3)	0.26	0.31	0.06
					(-23cm) VWC (m3/m3)	0.32	0.39	0.07
					(-23cm) Succión (kPa)	-985.00	-5.50	979.50
					(-36cm) VWC (m3/m3)	0.26	0.29	0.03
					(-36cm) Succión (kPa)	-933.10	-5.70	927.40

Figura 97. Características de los episodios más intensos del 2017

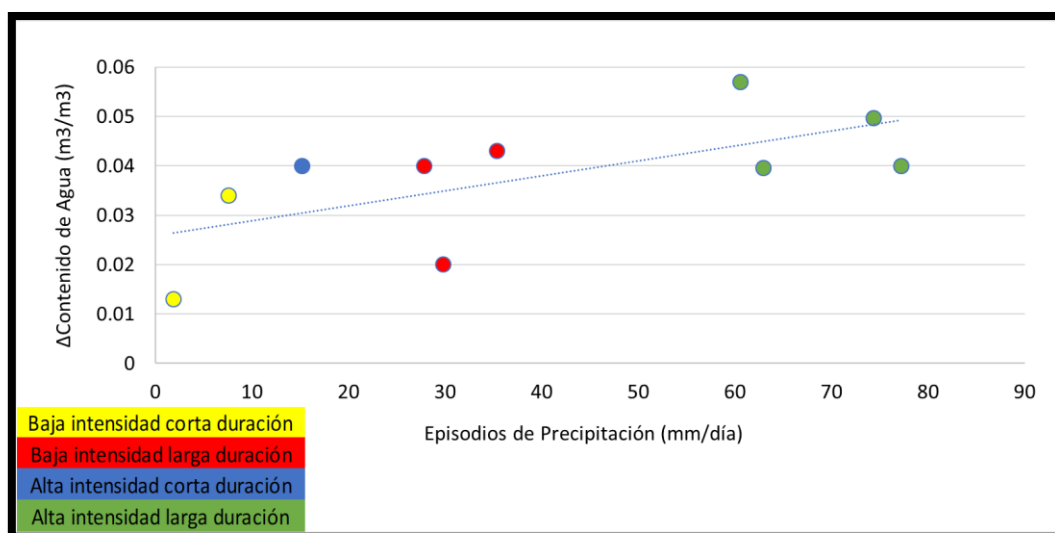


Figura 98. Relación de las máximas precipitaciones diarias y el contenido de agua del sensor (-11cm) del 2017

Como se muestra en la figura anterior, este sensor al ubicarse tan cerca de la superficie registra cambios significativos para todos los tipos de episodios. No obstante, de todos los cambios producidos los mayores son de lluvias intensas de larga duración. Se observa claramente la tendencia progresiva en los cambios de contenido de agua medida que se hace mayor la intensidad diaria.

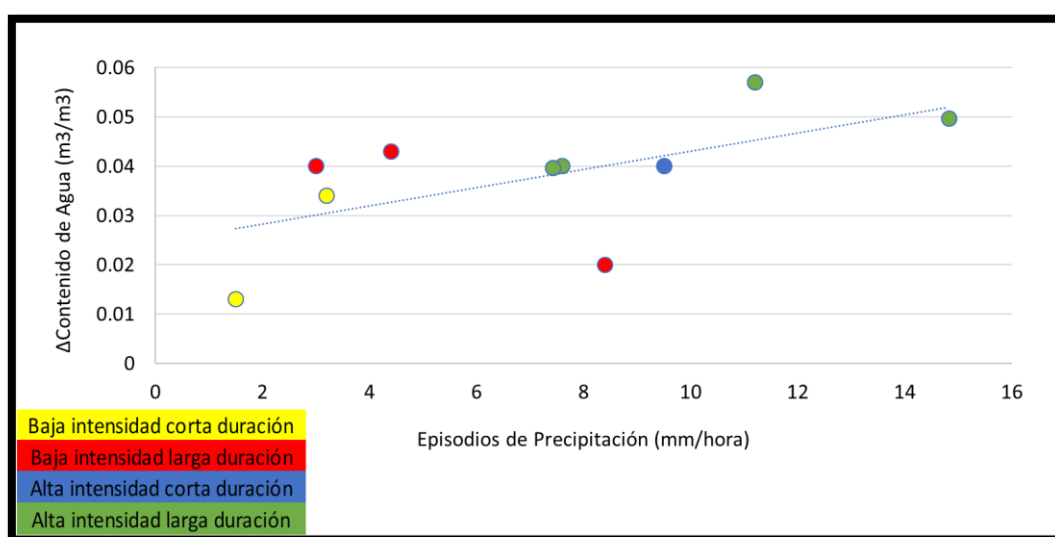


Figura 99. Relación de las máximas precipitaciones horarias y el contenido de agua del sensor (-11cm) del 2017

En la Figura 99 se interpreta que la tendencia es la misma que para las precipitaciones máximas diarias. Como se mencionó más arriba, a esta profundidad cualquier tipo de episodio puede ocasionar cambios, sólo episodios muy cortos y de muy baja intensidad provocarían cambios pequeños.

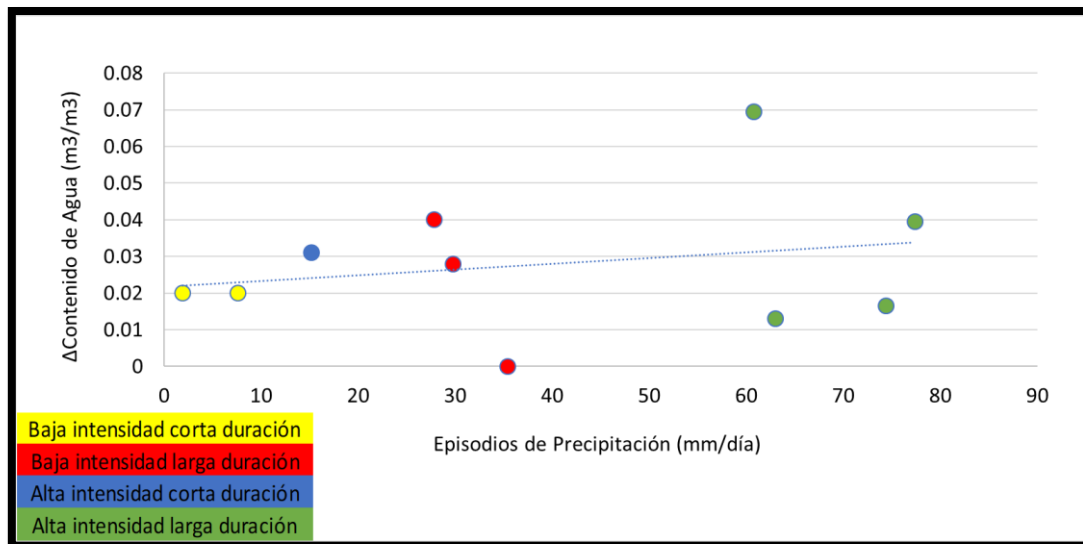


Figura 100. Relación de las máximas precipitaciones diarias y el contenido de agua del sensor (-23cm) del 2017

En la figura anterior se observa el comportamiento del sensor de (-23cm) ante los episodios de intensidad diaria. Al igual que en los años anteriores, el análisis de este año es muy similar, en el cual los cambios son progresivos a medida que aumenta la intensidad.

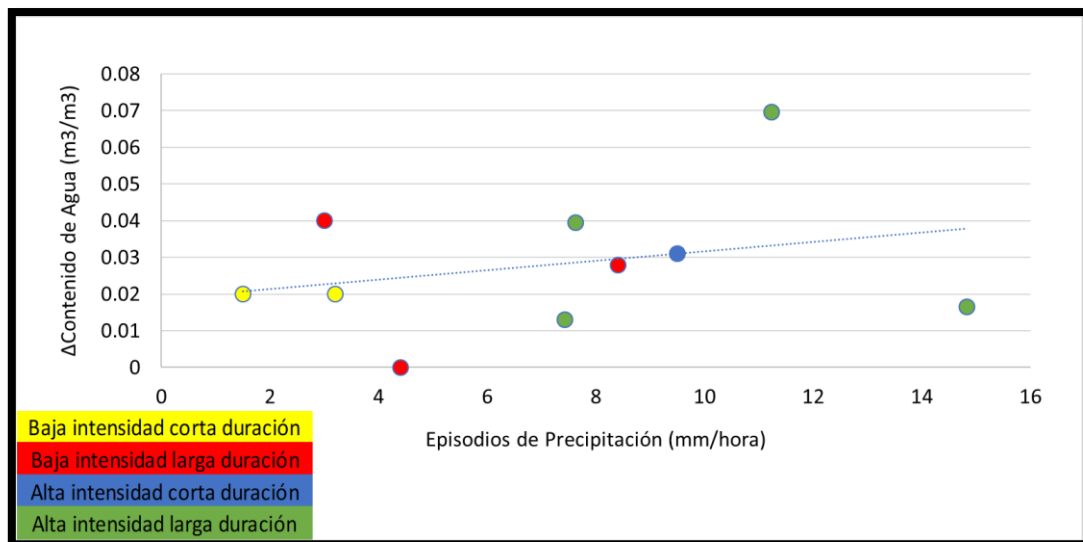


Figura 101. Relación de las máximas precipitaciones horarias y el contenido de agua del sensor (-23cm) del 2017

La tendencia presentada en el análisis de la figura anterior es el mismo que para las precipitaciones máximas diarias. En este caso los episodios de mayor intensidad horaria resultaron ser los de mayor intensidad diaria. Si se compara con los años anteriores se observa como estos episodios mostrados son de menor intensidad horaria.

En la Figura 102 se muestran las lecturas arrojadas por el sensor de mayor profundidad ante los episodios más intensos del año.

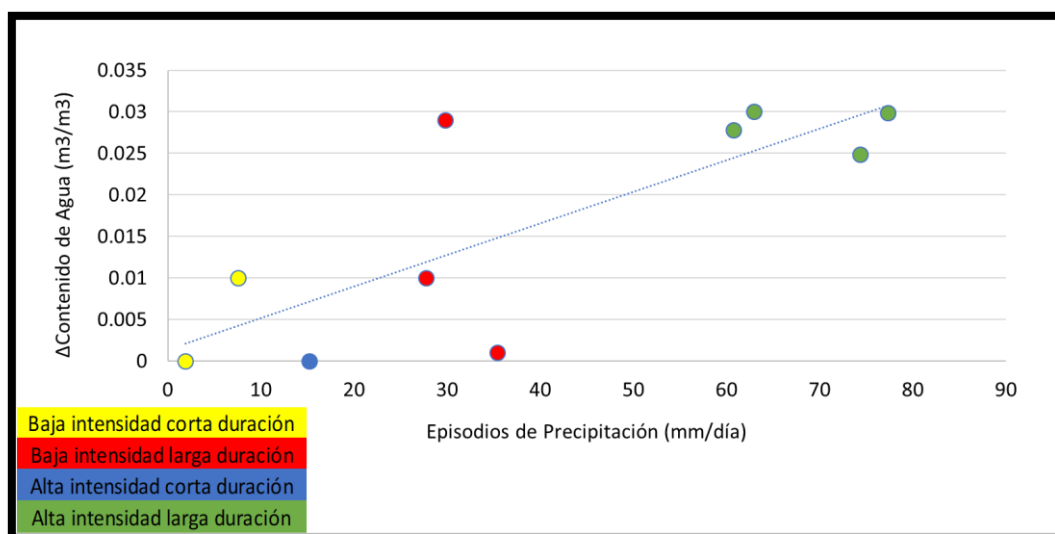


Figura 102. Relación de las máximas precipitaciones diarias y el contenido de agua del sensor (-36cm) del 2017

Primeramente, se puede apreciar que los cambios producidos en este año por este sensor son mucho menores a los de los años pasados. El incremento máximo registrado este año fue de 0.03 m³/m³, una cifra muy poco significativa. A pesar de los incrementos tan poco significativos, se observa la misma tendencia que se ha mostrado anteriormente, de incrementos progresivos a medida que se presentan episodios con grandes intensidades diarias.

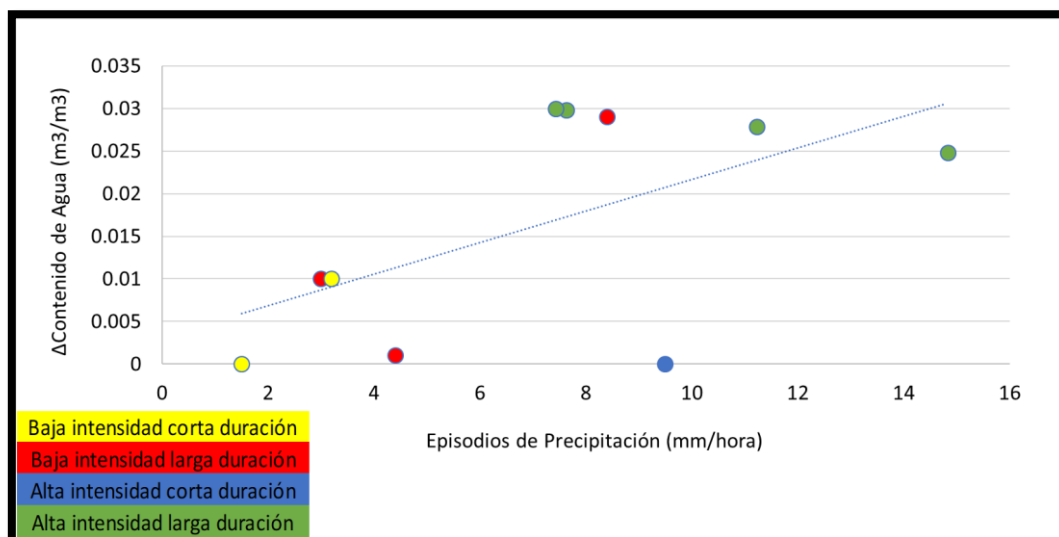


Figura 103. Relación de las máximas precipitaciones horarias y el contenido de agua del sensor (-36cm) del 2017

En la Figura 103 se aprecia la misma tendencia progresiva presentada en el caso de intensidades diarias. Como se mencionó anteriormente, los episodios con mayores intensidades diarias son los mismos que los de mayor intensidad horaria.

En la Figura 104 se muestran las lecturas del sensor de succión de (-23cm) ante los episodios seleccionados del 2017.

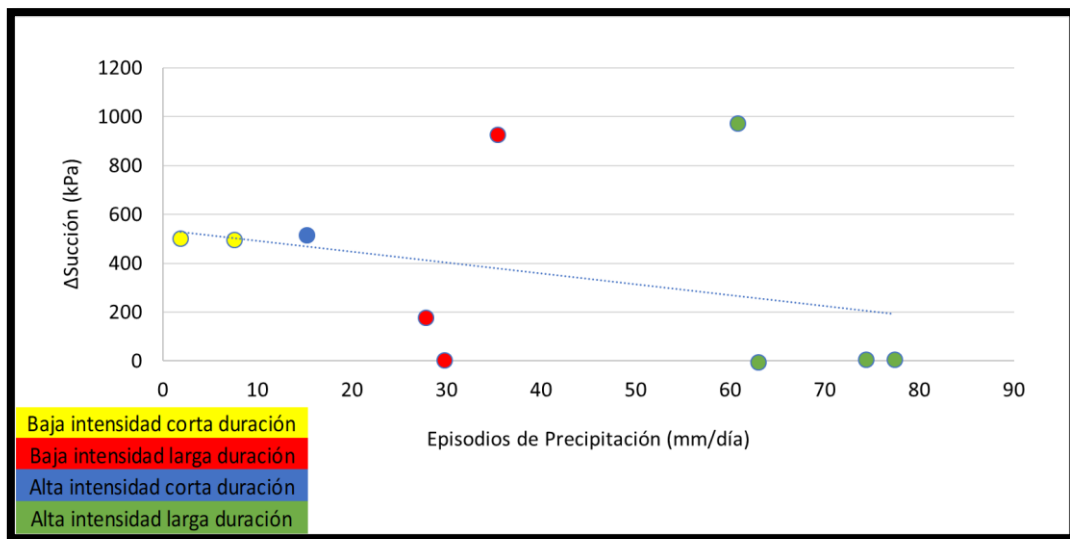


Figura 104. Relación de las máximas precipitaciones diarias y la succión del sensor (-23cm) del 2017

Al igual que en los años, la tendencia presentada en los análisis indica que a mayor intensidad diaria menores cambios de succión presentará el terreno a esta profundidad. Como se había comentado más arriba, los episodios por encima de la línea de tendencia presentaron succiones iniciales muy significativas por lo que se produjeron cambios importantes en las lecturas de los sensores ante los distintos episodios mostrados. Los casos con muy baja succión inicial, por más intensos que fueron sus episodios, no respondieron a ellos.

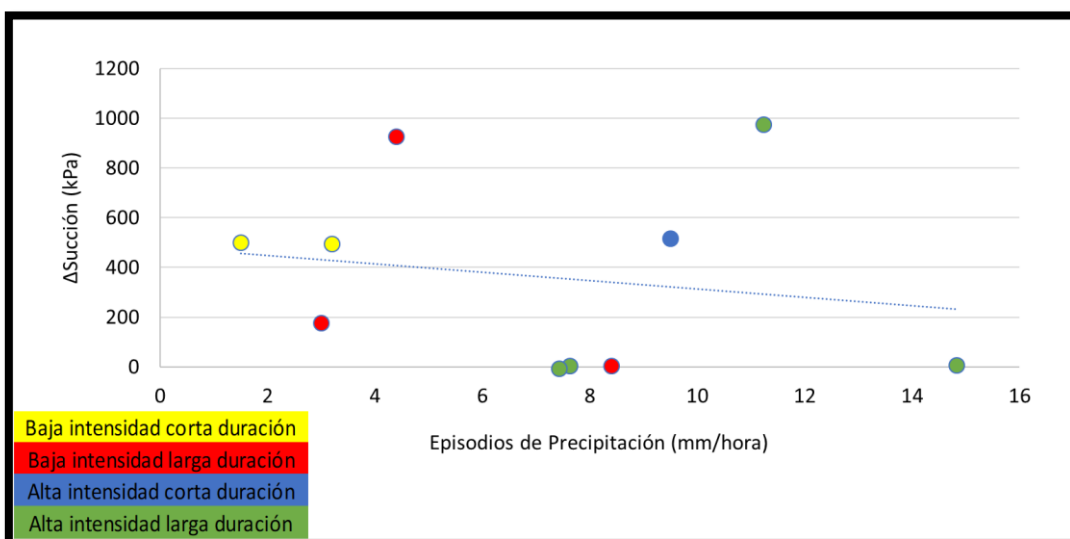


Figura 105. Relación de las máximas precipitaciones horarias y la succión del sensor (-23cm) del 2017

En la Figura 105 se observa el mismo comportamiento que en el análisis de precipitaciones máximas diarias. Los mayores cambios se produjeron ante episodios de baja intensidad horaria y en los casos en los que se registraron succiones iniciales altas. Este análisis demuestra que este sensor ofrece mayores respuestas ante episodios intensos de larga duración (precipitaciones máximas diarias) cuando la succión previa al episodio es alta.

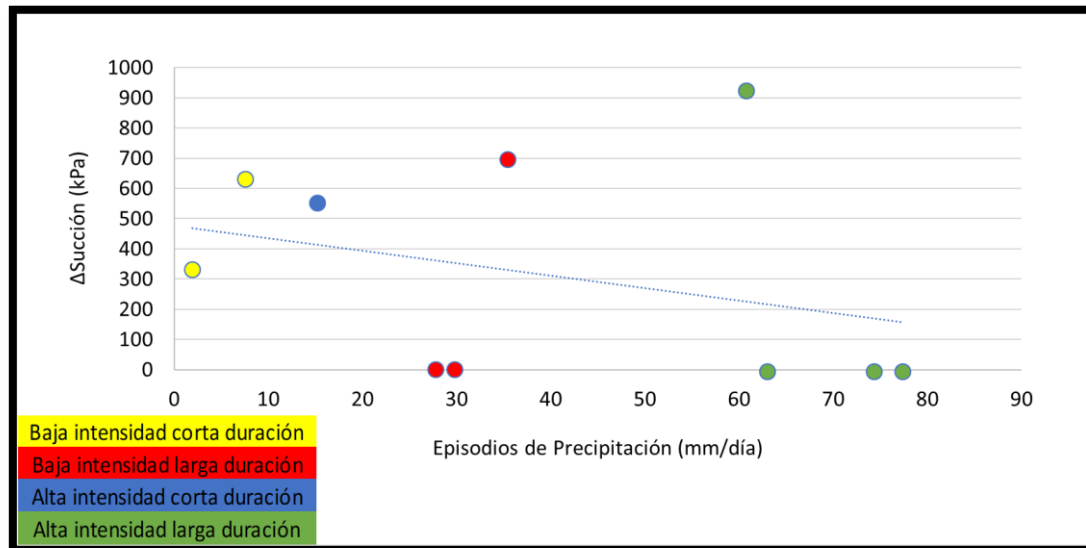


Figura 106. Relación de las máximas precipitaciones diarias y la succión del sensor (-36cm) del 2017

En el análisis del sensor de mayor profundidad, la tendencia es diferente a las presentadas en los años anteriores. Se observan que los dos casos de los episodios más intensos no respondieron a las lluvias correspondientes. Como se ha comentado anteriormente, los episodios que muestran muy bajas respuestas o nulas corresponden a casos con succiones iniciales muy bajas.

Si se analizan los episodios por encima de la línea de tendencia (altas succiones iniciales) se aprecia el mismo comportamiento que en los dos años anteriores (mayores respuestas ante altas intensidades diarias).

Observando el análisis para el mismo sensor, pero con las intensidades máximas horarias, se interpreta el mismo comportamiento en ambos casos. En este análisis mostrado en la Figura 107 se observan cambios importantes en casos de episodios de baja intensidad horaria.

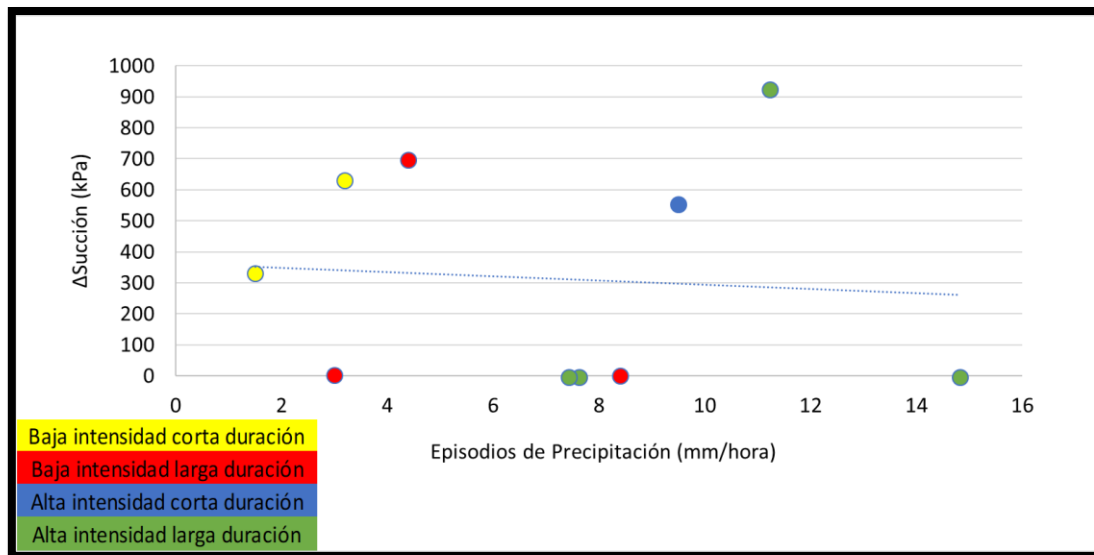


Figura 107. Relación de las máximas precipitaciones horarias y la succión del sensor (-36cm) del 2017

Finalmente, se muestran los análisis realizados de las lecturas del piezómetro. En la Figura 108 se exponen los ocho casos más significativos en los registros de la presión de agua.

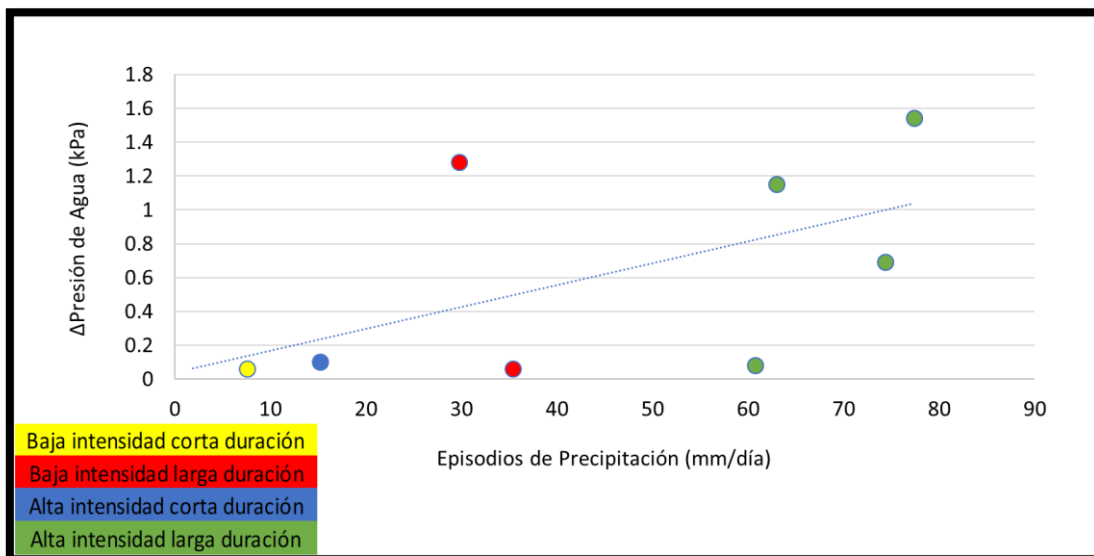


Figura 108. Relación de las máximas precipitaciones diarias y la presión de agua del piezómetro (-85cm) del 2017

Como en los dos años anteriores, las lecturas del piezómetro muestran una gran relación a precipitaciones máximas diarias (episodios intensos de larga duración). Como se puede observar en la figura anterior, los mayores cambios se presentan ante mayores intensidades.

Cabe destacar que el episodio de baja intensidad y larga duración (color rojo) ubicado por encima de la línea de tendencia, fue el caso en donde se registró el valor más alto de presión de agua en los tres años de estudio (3.31kPa).

Existe la posibilidad de que este caso ocurrido entre el 3 y 4 de marzo alcanzara tal cifra no solo por el episodio, sino también por el flujo de aguas subterráneas comentado anteriormente, debido a que los registros estaban incrementando antes de empezar las lluvias.

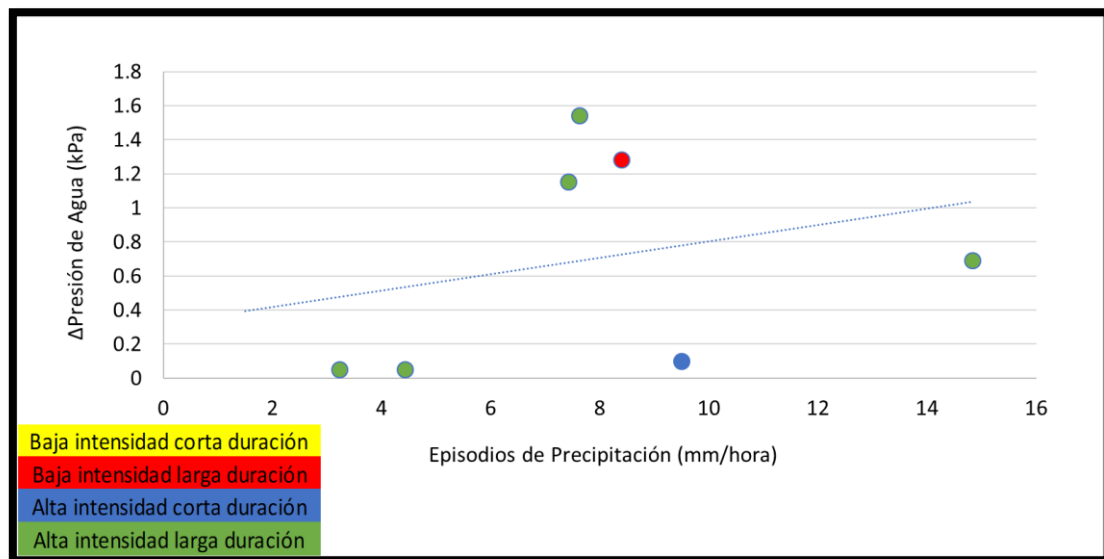


Figura 109. Relación de las máximas precipitaciones horarias y la presión de agua del piezómetro (-85cm) del 2017

Para finalizar los análisis, se presenta en la Figura 109 el comportamiento de la presión de agua ante las precipitaciones máximas horarias. Los mayores cambios se presentaron con intensidades horarias entre 7 y 9mm/hora. Luego de analizar ambos casos, se puede observar que los cambios tienen una mayor relación con episodios de máximas precipitaciones diarias.

5.8. Series completas 2015 – 2017

A continuación, se muestran las series completas con la finalidad de observar el desarrollo de los parámetros más importantes durante los tres años.

5.8.1. Precipitaciones

En la Figura 110 se muestran las precipitaciones anuales de los 3 años. Se distingue el episodio de mayor intensidad diaria de cada año. Asimismo, se observan que las precipitaciones de 2015 fueron las más intensas de los tres años. En el 2016 hubo más días de lluvias y en 2017 se produjeron algunos episodios intensos, pero en general las lluvias fueron de baja intensidad.

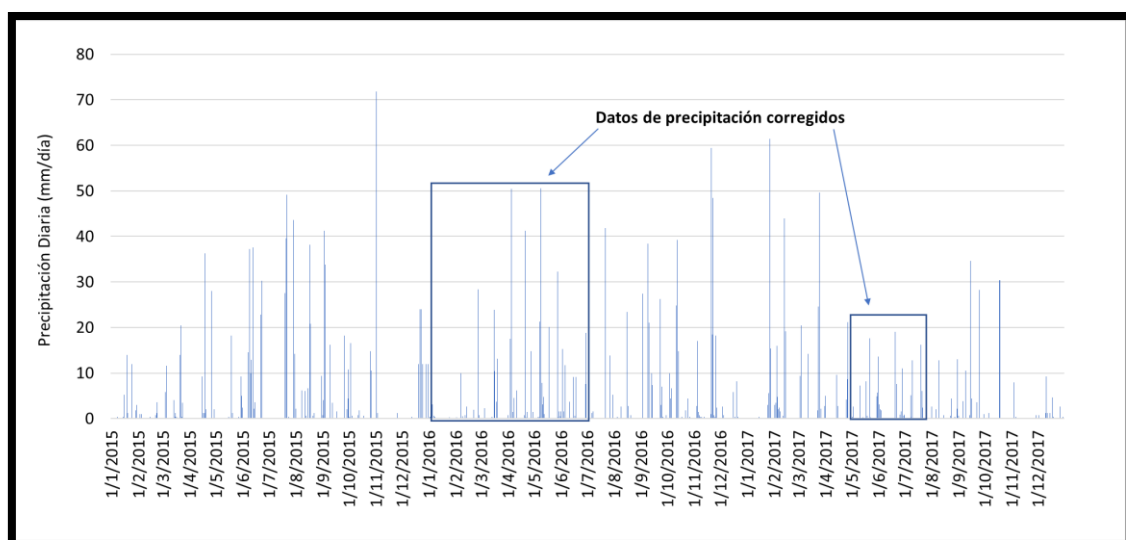


Figura 110. Precipitaciones diarias 2015-2017

En la Figura 111 se presentan las precipitaciones acumuladas de cada año. Se puede apreciar que las lluvias del 2017 fueron más intensas en el primer semestre, a diferencia de las del 2015, las cuales se intensificaron a partir del segundo semestre.

Las lluvias del 2016 se mantuvieron relativamente constantes durante todo el año. Asimismo, se evidencia la gran diferencia entre las precipitaciones acumuladas del 2015 y 2016 con las del 2017.

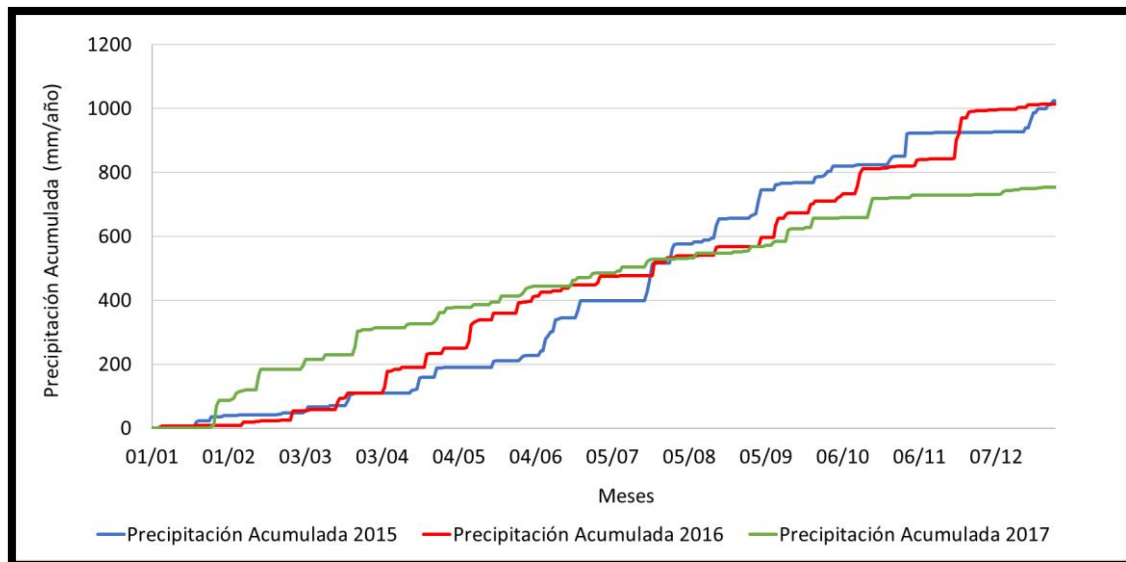


Figura 111. Precipitaciones acumuladas 2015-2017

5.8.2. Contenido de agua

En la Figura 112 se muestran los datos de los registros del contenido de agua de los tres años estudiados.

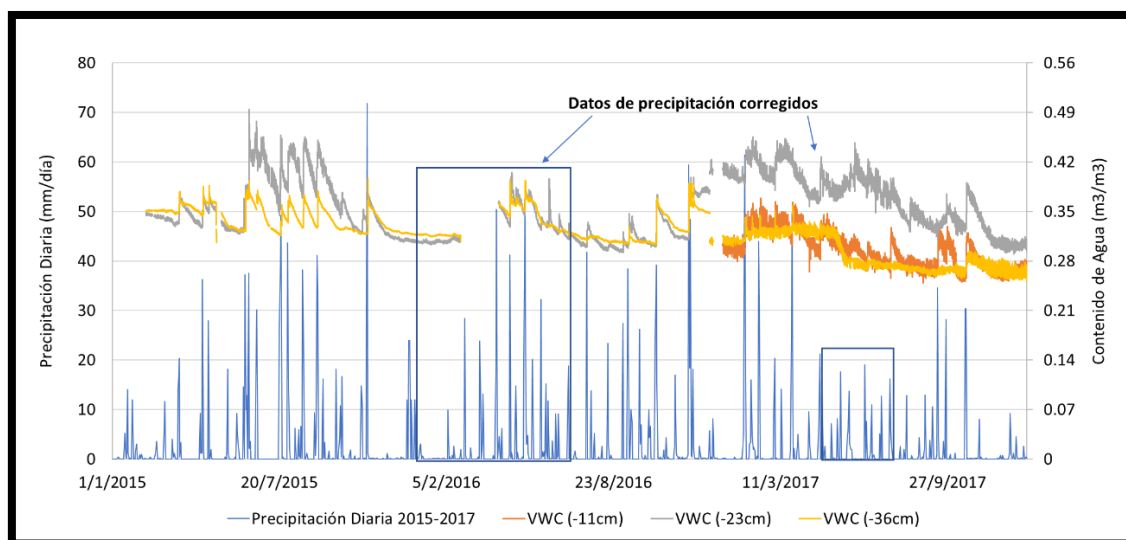


Figura 112. Comportamiento del contenido de agua ante las precipitaciones diarias del 2015-2017

En la figura anterior se observan las diferencias entre los contenidos de agua de cada año. Asimismo, se aprecia la rápida respuesta del terreno ante los episodios más intensos de los tres años.

Se puede apreciar que son más elevados los registros del sensor (-23cm) del año 2015. En el año 2016 los registros del mismo sensor son menores comparándolos con los del 2015 y 2017. El sensor de mayor profundidad (-36cm) muestra valores relativamente similares entre los años 2015 y 2016 pero para el 2017 disminuyen significativamente.

Se observa una clara diferencia de los registros (salto en las curvas) entre el final del 2016 e inicio del 2017. Esta diferencia podría deberse a una mala conexión del sensor de mayor profundidad (-36cm) debido al cambio en la instrumentación que se mencionó más arriba. Por esta razón se observan menores valores en las lecturas del 2017 en comparación con los de los años anteriores y mayores oscilaciones en los registros.

5.8.3. Succión

En la Figura 113 se muestran los datos de los registros de la succión de los tres años.

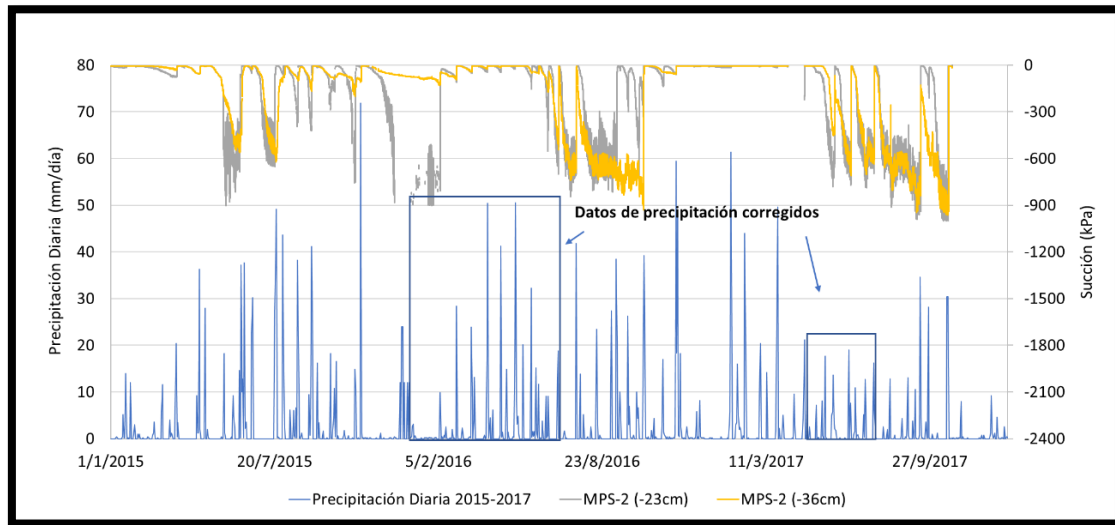


Figura 113. Comportamiento de la succión ante las precipitaciones diarias del 2015-2017

En la figura anterior se observa que en el año 2017 se alcanzaron valores de succión ligeramente superiores a los del 2015 y 2016. En los años 2016 y 2017 el sensor de mayor profundidad registró succiones mayores a las del sensor del 2015. El comportamiento de la succión de los años 2016 y 2017 fue relativamente similar, presentando una gran pérdida de succión en el mes de octubre de cada año.

5.8.4. Presión de agua

Los registros del piezómetro durante los tres años se muestran en la Figura 114.

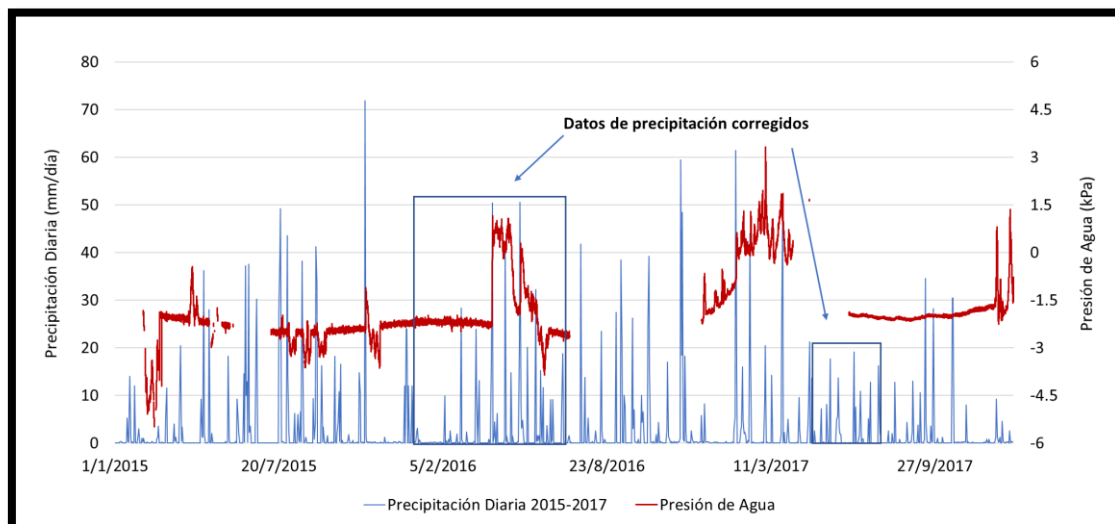


Figura 114. Comportamiento de la presión de agua ante las precipitaciones diarias del 2015-2017

En la figura anterior se observa el comportamiento de la presión de agua durante los tres años, en los que claramente se aprecia las respuestas rápidas del terreno ante las mayores precipitaciones. En el año 2015 se registraron ciertos cambios los cuales no fueron muy significativos debido a que las lecturas siempre se mantuvieron por debajo de 0 (presiones negativas). En el 2016 para la época de primavera se registró el mayor incremento de la presión de agua de los tres años estudiados, alcanzando por primera vez valores positivos.

Finalmente, en el año 2017 se volvieron a registrar valores positivos de presión de agua por una duración más prolongada que en el 2016. Asimismo, en el 2017 se evidenció el registro más alto de los tres años. Por lecturas registradas en el piezómetro en días en donde no coinciden con las precipitaciones, se piensa que existe un flujo de aguas subterráneas que afectan directamente al piezómetro.

5.8.5. Temperatura del suelo

El comportamiento de la temperatura del suelo a lo largo de los tres años estudiados se muestra en la Figura 115.

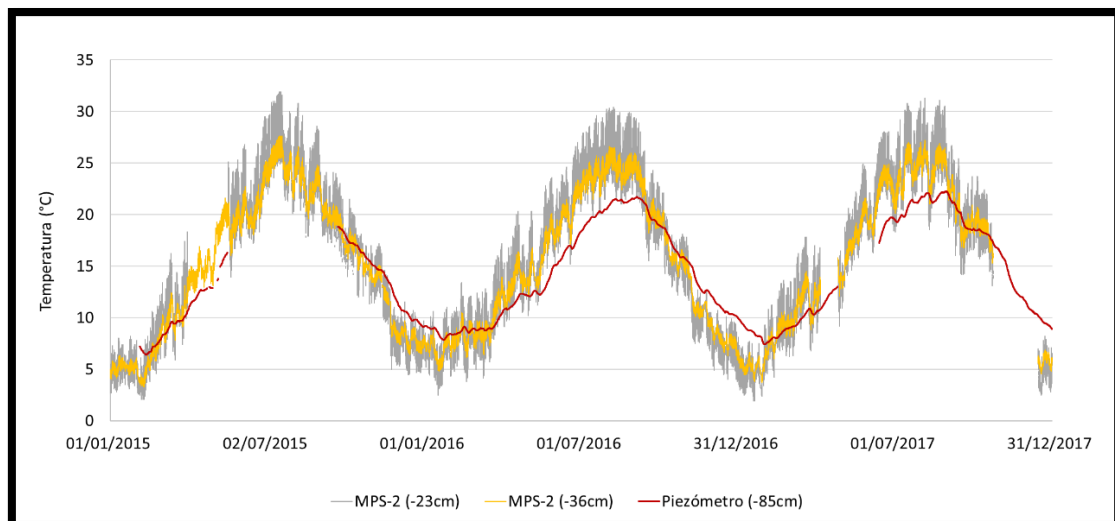


Figura 115. Comportamiento de la temperatura del suelo del 2015-2017

Los registros de la temperatura del suelo de cada año muestran el mismo comportamiento, en donde se observan mayores fluctuaciones a medida que disminuye la profundidad. Se registraron relativamente las mismas temperaturas para los meses más cálidos, en el caso del 2015 y 2017 superaron por muy poco los 30°C. En las épocas de invierno igualmente se registraron los mismos valores de temperatura para todos los años.

5.8.6. Temperatura del aire

Las lecturas de la temperatura del aire del 2015-2017 se muestran en la Figura 116.

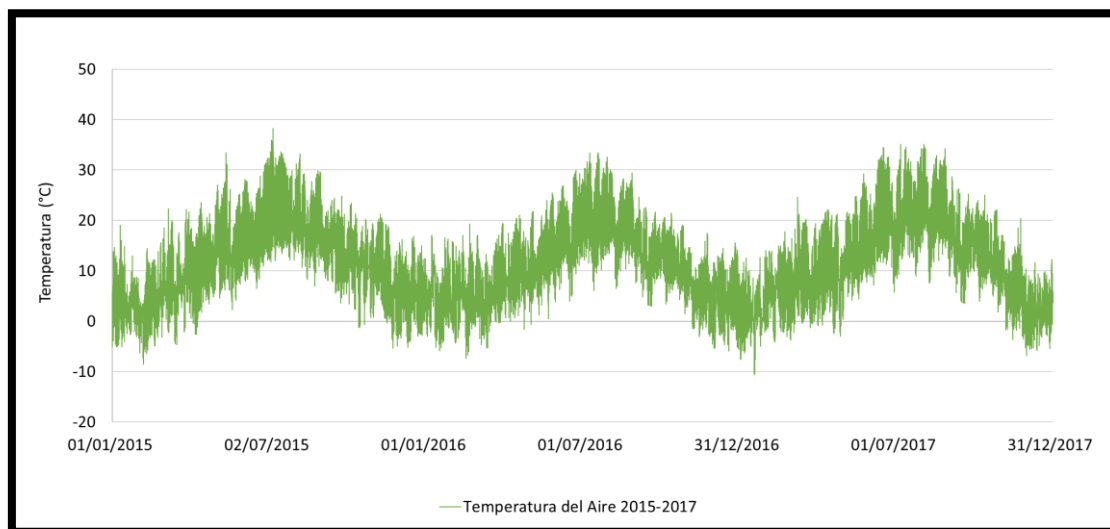


Figura 116. Comportamiento de la temperatura del aire del 2015-2017

El comportamiento de la temperatura del aire en los tres años fue muy similar, en donde para los meses de verano se registraron temperaturas por encima de los 30°C. En el caso del año 2017 se registraron temperaturas que alcanzaron los 35°C y para el año 2015 temperaturas de 38°C. En los meses de invierno se observaron relativamente las mismas medidas a excepción del 2017 que registró el 18 de enero algunos valores que alcanzaron los -10°C.

5.8.7. Relación de las precipitaciones con los registros del 2015 - 2017

A continuación, se tomaron los episodios de precipitaciones más intensos de cada año presentados en el apartado 5.7, mostrándose las relaciones de cada parámetro de los tres años en conjunto.

Como se muestra en la Figura 117, se observa el mismo comportamiento en las respuestas mostradas en los análisis independientes de cada año. Se interpreta la relación que tienen los cambios en las lecturas a medida que aumenta la intensidad de las lluvias. No obstante, se aprecia que episodios no tan intensos provocaron cambios en las lecturas debido a que se ubica relativamente cerca de la superficie (-23cm).

En el caso del análisis de las máximas precipitaciones horarias de la Figura 118, se observa que los mayores cambios se produjeron para intensidades entre 10 – 20mm/hora. Existe una tendencia a incrementar los registros a medida que aumenta la intensidad, pero para los episodios mostrados, aquellos casos con las intensidades horarias más altas no mostraron cambios tan significativos como los mencionados.

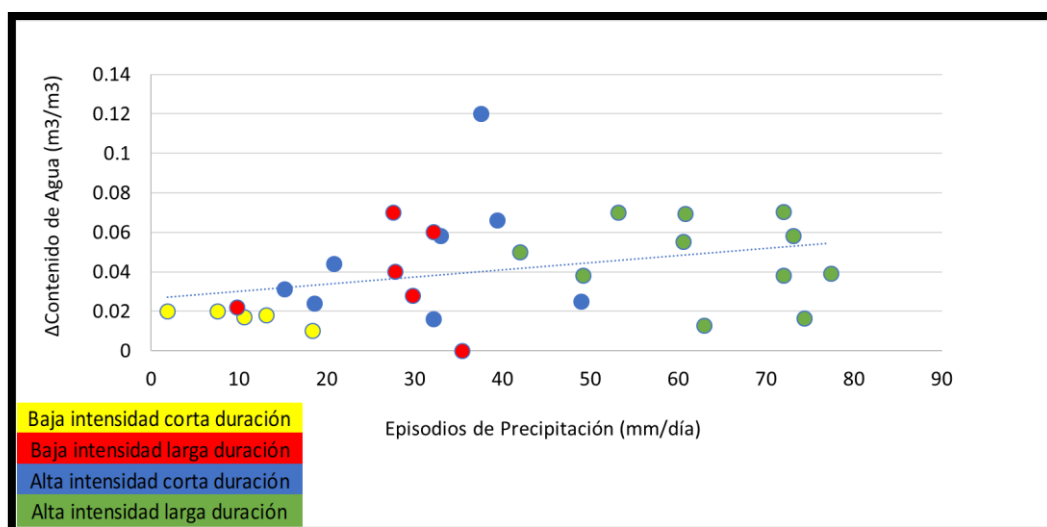


Figura 117. Relación de las máximas precipitaciones diarias y el contenido de agua del sensor (-23cm) del 2015-2017

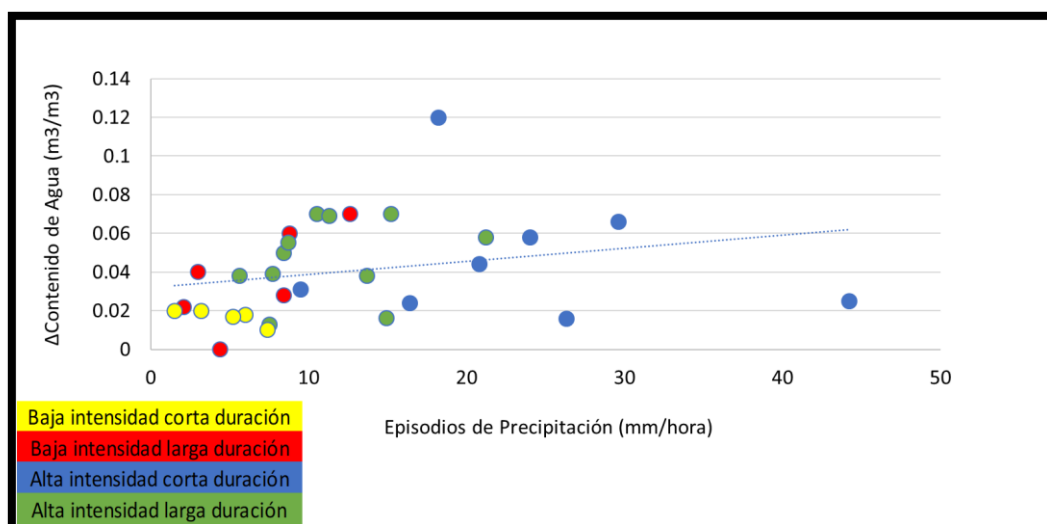


Figura 118. Relación de las máximas precipitaciones horarias y el contenido de agua del sensor (-23cm) del 2015-2017

Las lecturas arrojadas por el sensor de contenido de agua (-36cm) ante los episodios del 2015-2017 se muestran en la Figura 119. En el análisis se aprecia la tendencia progresiva que muestran los incrementos ante episodios de alta intensidad diaria. A medida que aumenta la profundidad se necesitan episodios intensos y duraderos, para provocar respuestas importantes en los registros.

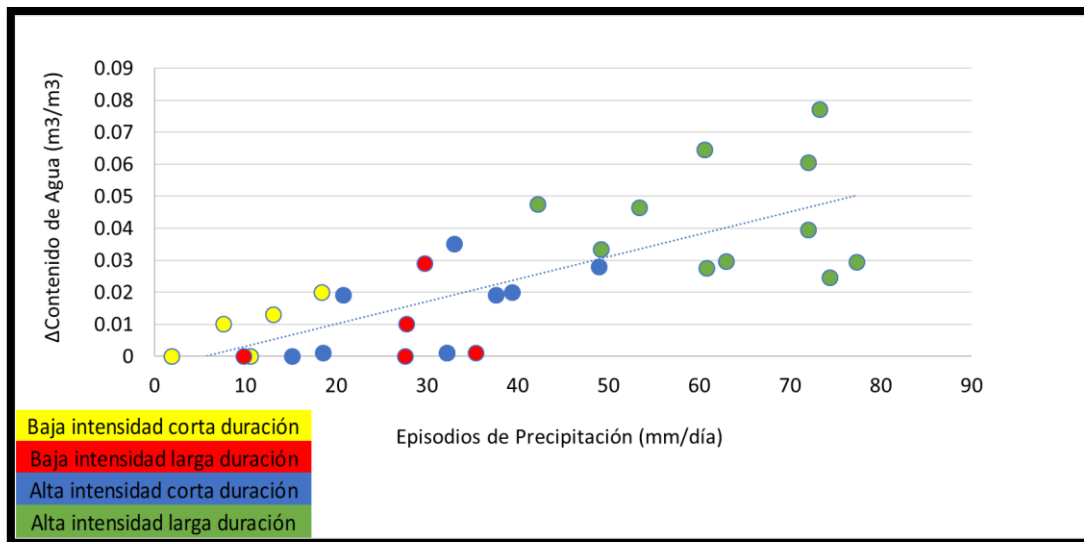


Figura 119. Relación de las máximas precipitaciones diarias y el contenido de agua del sensor (-36cm) del 2015-2017

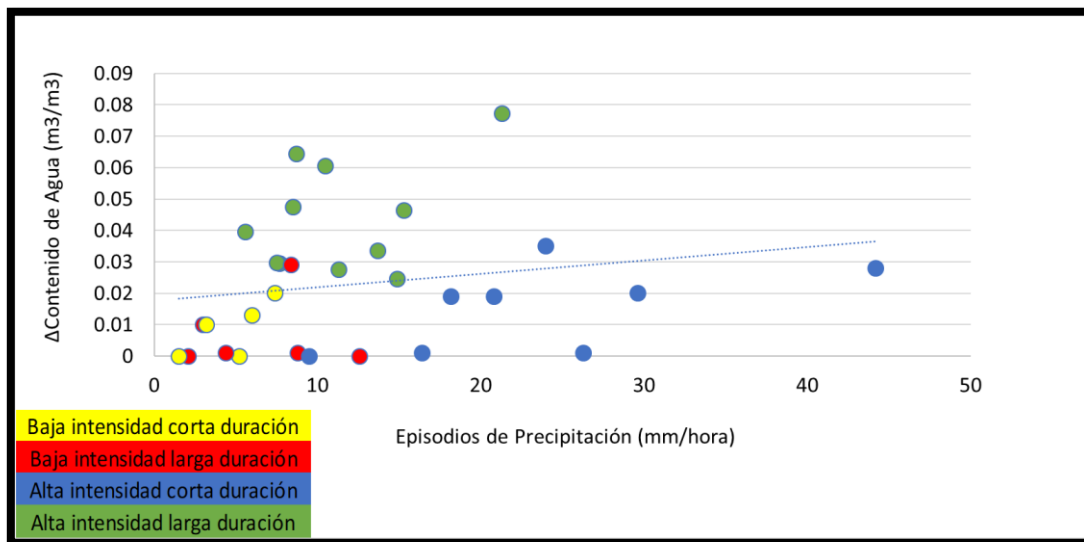


Figura 120. Relación de las máximas precipitaciones horarias y el contenido de agua del sensor (-36cm) del 2015-2017

En la figura anterior se presenta la relación del sensor de (-36cm) con las precipitaciones máximas horarias. El comportamiento es parecido al análisis del sensor de (-23cm) debido a que los mayores cambios se registraron para intensidades horarias entre 10-25mm/hora. Se observa claramente que los cambios poseen una mayor relación con episodios intensos de larga duración.

Las lecturas del sensor de succión más superficial ante los episodios del 2015-2017 se muestran en la Figura 121.

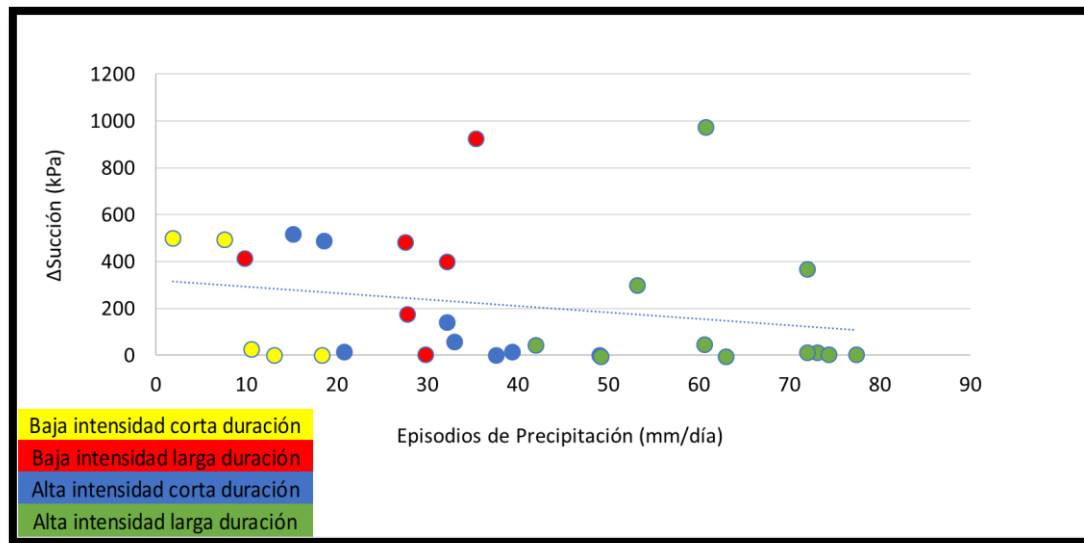


Figura 121. Relación de las máximas precipitaciones diarias y la succión del sensor (-23cm) del 2015-2017

Al igual que en los análisis independientes de cada año, los mayores cambios son presentados en los casos en donde se registraron succiones iniciales importantes (altos valores de succión antes de las lluvias). Por lo observado en el análisis, mientras más alto es el valor de succión inicial presentado en el terreno, mayores cambios se producirán en las lecturas. Episodios de cualquier tipo pueden provocar estos cambios mencionados.

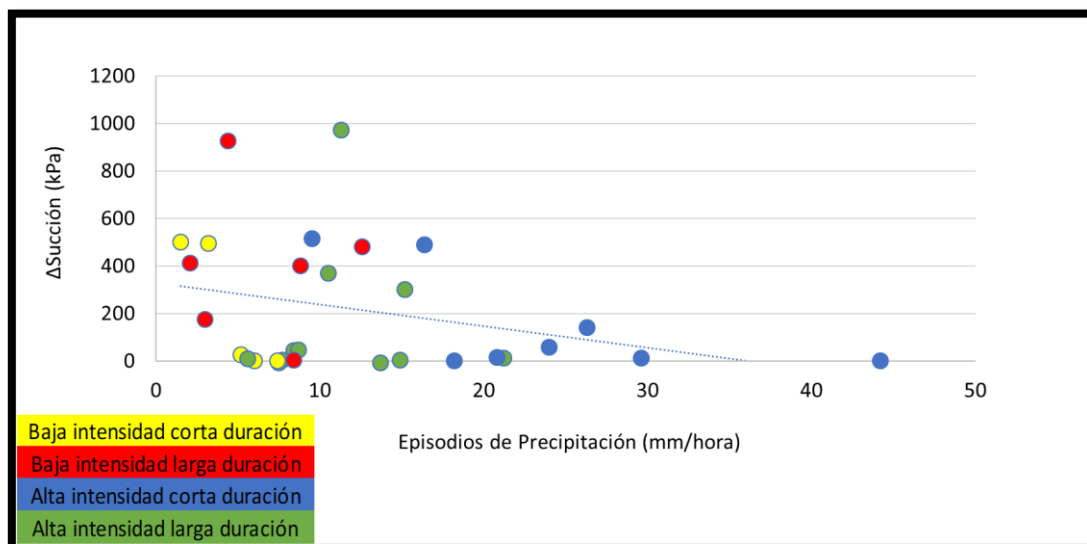


Figura 122. Relación de las máximas precipitaciones horarias y la succión del sensor (-23cm) del 2015-2017

En la figura anterior se observa la relación con las máximas precipitaciones horarias. Se interpreta el mismo comportamiento que el análisis anterior de precipitaciones máximas diarias, con la diferencia que los mayores cambios producidos se presentaron con precipitaciones de 10 – 20mm/hora.

Los registros presentados por el sensor de succión de mayor profundidad ante los episodios de precipitaciones máximas diarias del 2015-2017 se muestran en la Figura 123.

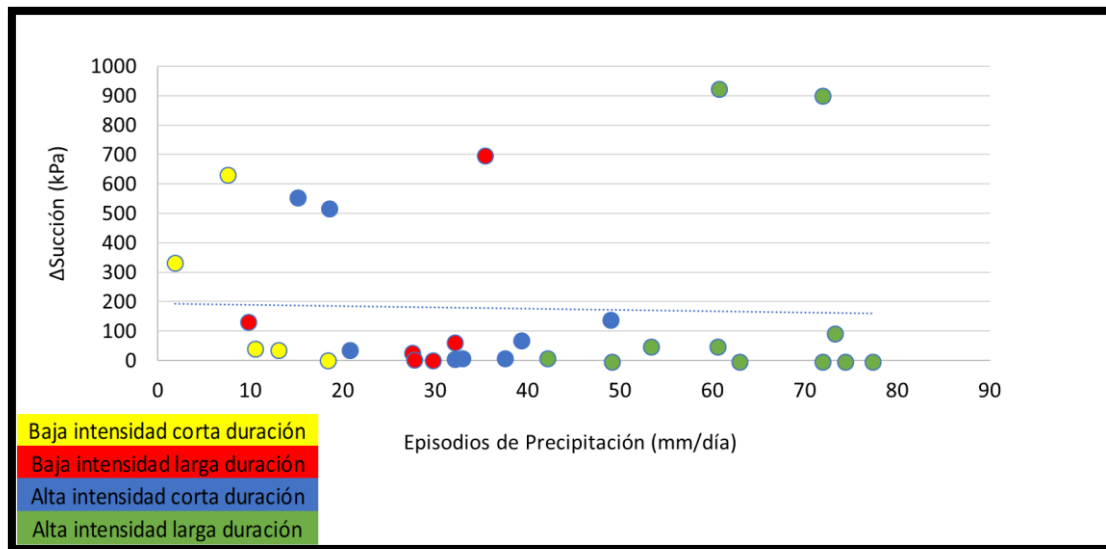


Figura 123. Relación de las máximas precipitaciones diarias y la succión del sensor (-36cm) del 2015-2017

Observando la figura anterior, se aprecia nuevamente que los cambios en los registros están controlados por las medidas de succión inicial que posea el terreno previo al episodio. Asimismo, si se observan los casos por encima de la línea de tendencia (altas medidas iniciales de succión) se aprecia una tendencia a presentarse mayores cambios a medida que aumenta la precipitación diaria.

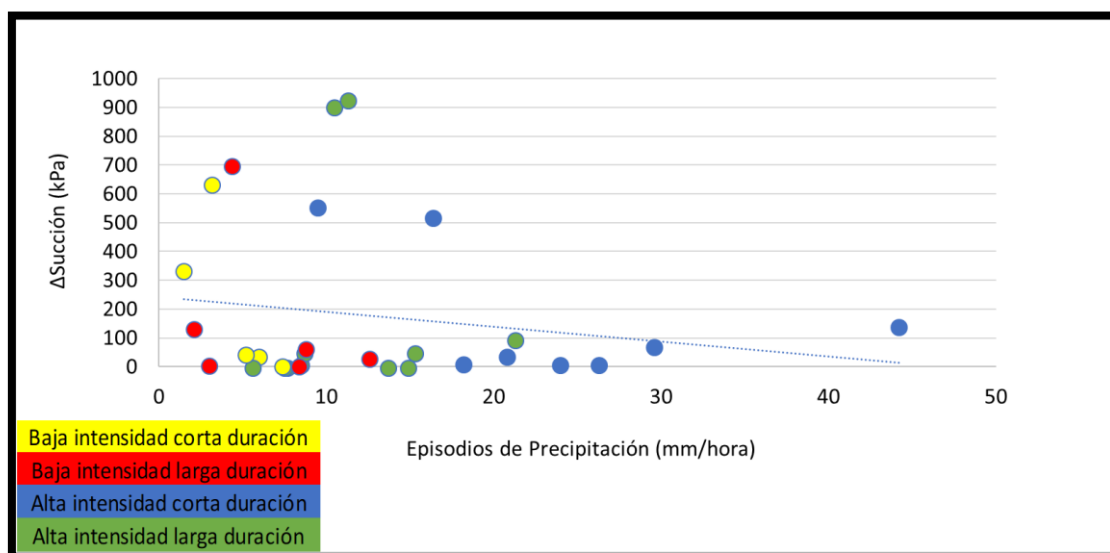


Figura 124. Relación de las máximas precipitaciones horarias y la succión del sensor (-36cm) del 2015-2017

En el caso presentado en la figura anterior, el comportamiento es el mismo al de la Figura 123, donde los cambios significativos se presentaron para los casos con succiones iniciales importante antes de las lluvias correspondientes.

En este análisis se observa que la mayoría de estos cambios mencionados, se produjeron por lluvias con intensidades de 5 – 15mm/hora.

Finalmente, los cambios presentados por el piezómetro ante las precipitaciones más importantes de los tres años estudiados se muestran a continuación.

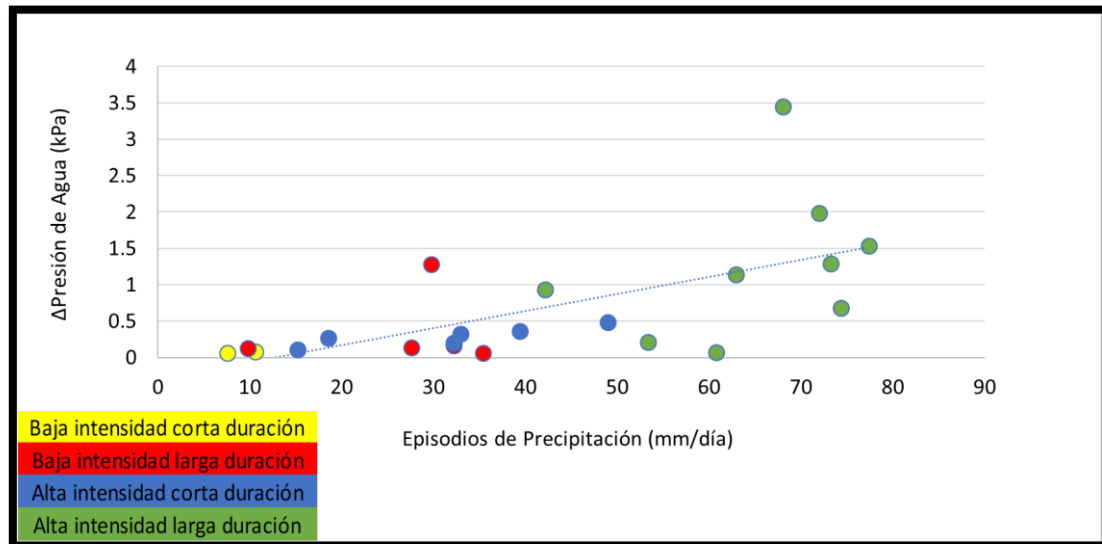


Figura 125. Relación de las máximas precipitaciones diarias y la presión de agua del piezómetro (-85cm) del 2015-2017

Como puede apreciarse en la figura anterior, la tendencia mostrada por los cambios es la misma que las presentadas en los análisis de cada año por separado. Se observa que los episodios de lluvias de alta intensidad diaria provocaron los mayores incrementos en las lecturas del piezómetro. Se observa claramente la tendencia progresiva de los cambios en los registros a medida que aumenta la intensidad diaria de las lluvias.

En el análisis de máximas precipitaciones horarias no se observa una tendencia progresiva como se plantea en la Figura 126. A medida que aumenta la intensidad horaria de las lluvias se van presentando menores incrementos en los registros. Entre los cambios que se produjeron en las lecturas del piezómetro, los más significativos fueron provocados por episodios intensos de larga duración, cuyas intensidades máximas horarias fueron de 5 – 10mm/hora.

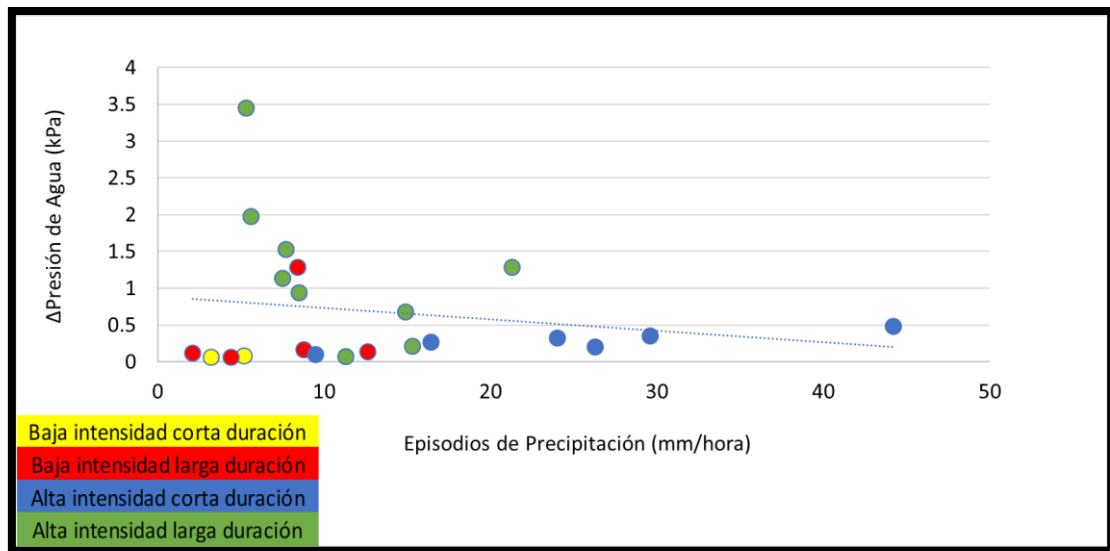


Figura 126. Relación de las máximas precipitaciones horarias y la presión de agua del piezómetro (-85cm) del 2015-2017

6. Conclusiones

Al finalizar los análisis de los datos auscultados desde el 2015 al 2017, se extrajeron una serie de conclusiones a partir de las respuestas de los parámetros involucrados en las interacciones entre el suelo y la atmósfera.

En los tres años estudiados se recopilaron los datos pluviométricos de cada uno, los cuales revelaron que el año con mayor cantidad de precipitaciones y que registró el episodio de mayor intensidad tanto diaria como horaria fue el 2015. A pesar de que el episodio de máxima precipitación diaria del año 2016 fue el menor de los tres años, sus episodios de alta intensidad fueron los más numerosos de todos los años. Finalmente, el año 2017 fue en el que se presentó la menor precipitación anual, la cual fue muy por debajo de las presentadas en los años anteriores. A pesar de que registró el segundo episodio de máxima precipitación diaria de los tres años, el resto de sus episodios fueron significativamente menos intensos que los demás años.

En cuanto a la temperatura del aire y del suelo, el comportamiento de cada uno fue prácticamente el mismo en cada año, en donde no se registraron temperaturas extremas, salvo en el 2017 que la temperatura del aire por unas horas alcanzó los -10°C . A partir del comportamiento de la temperatura del suelo, se evidenció que se producen menores fluctuaciones en los registros a medida que aumenta la profundidad.

A partir de las curvas de retención trazadas con los datos de succión y contenido de agua, se observó prácticamente la misma situación en donde los valores de succión experimentaron grandes cambios sin variar significativamente grado de humedad.

En cuanto a los instrumentos de auscultación instalados en la ladera, se extrajeron una serie de observaciones a partir de las respuestas de cada sensor. Cabe destacar que las respuestas presentadas por cada sensor ante los episodios de lluvias fueron relativamente rápidas, mostrando el grado de fisuración existente en el terreno.

- Sensor de contenido de agua (-11cm):
Durante los análisis se observó que este nuevo sensor responde tanto a episodios de alta intensidad diaria como horaria pero un poco más para los primeros. No obstante, al estar tan cerca de la superficie episodios de baja intensidad también provocan cambios en sus lecturas.
- Sensor de contenido de agua (-23cm):
Este sensor presentó respuestas significativas para algunos episodios de alta intensidad horaria, sobre todo en el año 2015. Sin embargo, se observó una mayor relación ante episodios de alta intensidad y larga duración. En este año 2015 se registraron los mayores cambios de este sensor. En general este sensor presenta mayores incrementos a medida que aumenta la intensidad de las lluvias.
- Sensor de contenido de agua (-36cm):
En general los mayores cambios producidos a esta profundidad se registraron en el 2015 y 2016, siendo los presentados en el 2017 muy poco significativos.

En general se evidenciaron mayores incrementos en las lecturas luego que cae la mayor intensidad horaria de un episodio de larga duración.

- **Sensor de succión (-23cm):**
El año en donde se desarrollaron mayores valores de succión fue en el 2017 (el más seco de los 3) y asimismo se registraron los mayores cambios de los 3 años estudiados. Se observó que los mayores cambios de los registros en los tres años dependen del valor de succión que posea el terreno antes del episodio. Los mayores incrementos (pérdida de succión) se produjeron en los casos en donde existía una alta succión previa al episodio. Estos incrementos fueron provocados por lluvias de cualquier tipo, pero más por episodios de alta intensidad diaria.
- **Sensor de succión (-36cm):**
El año 2015 fue el que presentó los valores de succión más bajos de todos. Por esto sus cambios fueron poco significativos. En cambio, en el 2016 y 2017 se desarrollaron altos valores de succión y se presentaron grandes cambios que respondieron a episodios intensos de larga duración. A partir de estos análisis se interpretó que a medida que aumenta la intensidad y duración de las lluvias los cambios serán mayores mientras mayor succión inicial presente el terreno antes del episodio.
- **Piezómetro (-85cm):**
En el año 2016 se produjeron los mayores cambios en los registros del piezómetro, mientras que en el 2017 se alcanzó el mayor valor en las lecturas de los 3 años. En el 2015 las lecturas fueron negativas a lo largo de todo el año, a diferencia del 2016 y 2017 que registraron valores positivos de presión de agua. Por los episodios analizados durante los tres años, se observan mayores incrementos en los registros ante la presencia de episodios de alta intensidad y larga duración.

En general, por su cercanía con la superficie, el sensor (-11cm) de contenido de agua responde a cualquier tipo de lluvia, pero presenta mayores cambios mientras más intensas sean dichas lluvias. El sensor de contenido de agua (-23cm) presenta mayores cambios a medida que aumenta la intensidad tanto diaria como horaria de los episodios. El sensor de contenido de agua (-36cm) presenta mayores respuestas para episodios de alta intensidad diaria luego que se produce la mayor intensidad horaria del episodio. Los sensores de succión presentan cambios en las lecturas mientras más alto es el valor inicial de succión presente en el terreno y son provocados por cualquier tipo de lluvia. Sin embargo, de los cambios registrados, los mayores fueron provocados por episodios de alta intensidad diaria. Finalmente, los cambios observados en el piezómetro responden a episodios de alta intensidad y larga duración.

7. Referencias

(s.f.).

10HS Soil Moisture Sensor: Operator's Manual. (s.f.). *ICTINTERNATIONAL*. Obtenido de http://www.ictinternational.com/content/uploads/2014/03/13508_10HS_Web.pdf

BMP085 Digital Pressure Sensor Data Sheet. (s.f.). *Sparkfun Electronics*. Obtenido de <https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/General/BST-BMP085-DS000-05.pdf>

Cedeño Ramírez, R. (28 de Septiembre de 2014). CARACTERIZACIÓN, AUSCULTACIÓN Y ESTUDIO DE UN DESLIZAMIENTO EN EL PRE-PIRINEO. Barcelona, Barcelona, España.

Clasificación de Köppen en territorio español. (s.f.). *Meteo Illes Balears*. Obtenido de <http://www.meteoillesbalears.com/?p=272>

Climate-Data. (s.f.). Obtenido de es.climate-data.org

Corominas, J. (1997).

Corominas, J. (1997). Tipos de Roturas en Laderas y Taludes. Obtenido de <http://www2.etcg.upc.edu/asg/Talussos/pdfs/ClasificacionDeslizamientos.pdf>

Gómez Méndez, C. (Diciembre de 2008). Análisis del efecto de la cohesión aparente en la capacidad soportante de cimentaciones superficiales. Costa Rica.

González de Vallejo et al., L. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación.

HC2S3 Temperature and Relative Humidity Instruction Manual. (s.f.). *Campbell Scientific, Inc*. Obtenido de <https://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/hc2s3.pdf>

High Resolution Rain Gauge Manual. (s.f.). Obtenido de http://www.ictinternational.com/pdf/?product_id=262

Ibsen et al., M.-L. (1996). Landslide Recognition. En M.-L. Ibsen, R. Dikau, D. Brunsden, & L. Schrott, *Landslide Recognition: Identification, Movement and Causes* (pág. 219). Chichester: John Wiley & Sons.

Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña. (s.f.). Mapa Geológico de Cataluña: Berga. Cataluña, España. Obtenido de ICGC: <http://www.icgc.cat>

Iwata et al., S. (1995). *Soil-Water Interactions Mechanism and Applications*. New York: Marcel Dekker.

Martínez Camposano, G. (Septiembre de 2016). Análisis del comportamiento del suelo por infiltración en una ladera y su relación ante el deslizamiento superficial de Cercs. Barcelona, Barcelona, España.

Moya, J. (2017). Apuntes Clase Geología.

MPS-2 Dielectric Water Potencial Sensor: Operator's Manual. (s.f.). *ECOTEK*.
Obtenido de <http://www.ecotek.com.cn/download/Manual-MPS-2%20sensor-EN.pdf>

Universidad Nacional de Rosario. (Agosto de 2003). Estabilidad de Taludes. Rosario, Argentina.

USGS. (2004). Obtenido de <https://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/fs-2004-3072.html>

USGS. (2008). Obtenido de https://pubs.usgs.gov/circ/1325/pdf/C1325_508.pdf

Villarraga Díaz, C. J. (May de 2014). Deterministic assessment of slope failure in unsaturated volcanic ashes. The case of cervinara slope. Barcelona, Barcelona, Spain.

VW Piezometers Instruction Manual. (s.f.). *GEONSENSE*. Obtenido de <https://www.geosense.co.uk/media/ProductManual/1/file/VWPiezometerManualVWP3000V1.9.pdf>

WS12 Position Sensor Datasheet. (s.f.). Obtenido de http://www.sensores-de-medida.es/uploads/asm_ws12.pdf